

발간등록번호

11-1541000-001378-01

에너지절약형 복합온실환경에너지관리 시스템

Comprehensive Environment-Energy Management System
for Energy Saving in Greenhouse

서울대학교 산학협력단
경기도농업기술원

농림수산식품자료실



0007243

농림수산식품부

제 출 문

농림수산식품부 장관 귀하

이 보고서를 “에너지절약형 복합온실환경에너지관리 시스템” 과제의 보고서로 제출합니다.

2012 년 4 월 9 일

주관연구기관명 : 서울대학교 산학협력단

주관연구책임자 : 이 중 용

세부연구책임자 : 이 중 용

연 구 원 : 류 덕 곤, 박 창 만,
이 상 은, 강 문 식,
이 계 능, 이 중 학,
양 승 환, 알리레자,
이 춘 구, 이 원 규,
권 태 형

협동연구기관명 : 경기도농업기술원

협동연구책임자 : 이 상 덕

연 구 원 : 이 상 우, 심 상 연,
임 재 옥, 이 영 석,
백 미 영, 양 승 환,
황 옥 화, 박 서 연

요 약 문

I. 제 목

에너지절약형 복합온실환경에너지관리 시스템

II. 연구개발의 목적 및 필요성

최근 시설원예는 온도, 습도, 이산화탄소, 광 등의 복합 환경 제어가 가능한 첨단 온실들의 보급이 증가하고 있다. 하지만 복합 환경 제어를 수행하기 위해서는 다량의 에너지가 소모된다. 최근 국제 유가의 상승 등의 에너지 가격 상승으로 인한 시설 원예 농가의 수익 악화는 갈수록 심해지고 있다. 따라서 복합 환경 제어를 수행하면서도 에너지 비용을 절감할 수 있는 기술개발이 시급한 실정이다.

온실은 태양광 에너지를 이용하는 대표적인 시설로써 저온기인 겨울철에도 일조시간에는 난방 없이도 작물 생육이 가능할 만큼 온도가 상승한다. 오히려 환기를 수행하지 않을 경우 한 겨울에도 27℃ 이상의 고온에 도달하기 때문에 작물 생육을 저해할 수 있다. 이 때 온실 내부의 공기열 에너지를 회수하여 활용한다면 온실의 환경 제어와 에너지 절감을 동시에 수행할 수 있다. 또한 온실에서 회수 가능한 에너지로는 연소식 CO₂ 발생기를 이용할 경우 배기가스의 열에너지, 보광을 운영할 경우 보광 장치에서 발생하는 열에너지 등이 있다. 하지만 이와 같은 에너지들은 모두 환경 제어와 관련이 있기 때문에 환경 제어와 에너지 관리를 복합적으로 수행하여야 한다.

본 연구 목적은 온실 내 공기열 에너지, 연소식 CO₂ 발생기의 배기가스 열에너지, 보광 장치의 열에너지를 효과적으로 활용할 수 있는 기계 시스템을 개발하고 이 시스템을 원격으로 운영할 수 있는 자동 제어 시스템을 개발하여 환경 제어와 에너지 관리를 복합적으로 수행하는 것이다. 또한 유리 온실과 비닐 온실에 개발된 시스템을 적용하여 시험 작물을 재배하여 에너지 절감 효과 분석과 작물의 생육 개선 효과 분석을 수행하는 것이다.

III. 연구개발 내용 및 범위

1. 하이브리드 히트펌프 시스템 개발

온실에서 발생하는 잉여열 에너지는 저온 형태로 발생하기 때문에 난방에 활용하기 위해서는 고온의 에너지 형태로 전환하는 것이 필요하다. 본 연구에는 이를 위해 히트펌프 시스템을 개발하였다. 온실의 잉여 열에너지는 에너지원 별로 발생시간이 다르고, 회수한 열에너지를 이용하는 시간도 다르다. 따라서 에너지를 저장할 수 있는 축열 방식의 히트펌프 시스템을 개발하였다. 냉방과 난방이 모두 가능하도록 고온 축열조와 저온 축열조를 각각 구비하였고, 회수된 잉여 열에너지가 난방을 수행하기에 충분하지 않은 경우를 대비하여 전기 히터와 지하수 열 이용이 가능한 하이브리드 히트펌프 시스템을 개발 하였다.

2. 연소열 회수형 CO₂ 발생기 개발

온실의 이산화탄소 시비는 보통 오전 중에 집중적으로 수행하는 것이 경제적인데 실제 이 시간대에는 태양광에 의해서 온실의 온도가 충분히 높아진다. 따라서 연소식 CO₂ 발생기의 배기가스 열에너지는 회수하여 저장하였다가 야간 난방을 위한 에너지로 활용해야 한다. 배기가스 열에너지를 회수하기 위해서 CO₂ 발생기에 열교환기를 장착하고 이를 히트펌프 시스템과 연계하여 효과적으로 열에너지를 회수하고 온실로 공급되는 CO₂ 혼합 공기의 온도는 충분히 떨어뜨렸다. 또한 이산화탄소 시비가 수행되는 동안 온실의 환기를 막기 위해서 냉방 제어와 연계하는 CO₂ 공급 전략을 수립하여 시스템에 적용하였다.

3. 유비쿼터스 복합 환경-에너지 관리 및 제어 시스템 개발

환경 제어와 에너지 소모, 잉여 열에너지 발생은 상호 연관되어 있기 때문에 환경 제어와 에너지 관리를 복합적으로 수행하기 위해서 목표한 환경 제어 조건과 개별 환경 제어 장치들을 유기적으로 결합하고 상호 제어 로직을 개발하였다. 따라서 히트펌프 시스템, CO₂ 발생기, 보광, 온실의 창 개폐 및 보광, 차광 스크린 운영 등이 상호 연계되어 수행된다. 또한 원격으로 복합 제어를 수행할 수 있도록 하였는데 인터넷과 스마트폰을 이용한 에너지 모니터링 및 제어가 가능하도록 하였다.

4. 개발된 시스템을 이용한 식물 생육 개선 효과 분석

개발된 시스템을 이용한 환경 제어 및 에너지 절감 효과를 분석하기 위해서 유리 온실과 비닐 온실에서 실제로 시험 작물을 재배하였다. 유리 온실에서는 고온성 작물인 분화 장미를 재배 하였고, 비닐 온실에서는 저온성 작물인 심비디움을 재배하였다. 경유 보일러로 난방만 수행되는 관행 방식의 온실에서도 동일한 기간에 시험 작물을 재배하여 생육 효과 및 에너지 절감 효과를 분석 하였다.

IV. 연구개발결과

1. 시스템 개발

고온 축열조와 저온 축열조를 갖춘 하이브리드 히트펌프 시스템과 연소열 회수가 가능한 LPG 연소식 CO₂ 발생기, 그리고 인터넷과 스마트 폰에서 이용이 가능한 유비쿼터스 복합 환경-에너지 제어 시스템이 개발되었다. 축열조에 저장되는 열유체는 지하수를 이용하였고 온실 내 열회수 및 공급을 위해서 다수의 FCU를 설치하였다. 특히 온실 상부 공기열을 효율적으로 회수하기 위해서 온실 상부에도 FCU를 설치하였다. 보광시설은 고압나트륨등을 설치하였다. 복합 환경-에너지 제어 시스템에는 8 bit MCU를 이용하여 개별 장치 제어 및 환경 제어 개별 기기와의 통신, 환경 계측 및 에너지 데이터 저장을 동시에 수행하는 하나의 통합 보드를 제작하였다. 복합 환경-에너지 제어 시스템은 웹서버 및 프로그램과 연계되었다.

저온 축열조에는 10 ~ 15℃의 저온수를 채워서 온실 내 잉여 공기열 에너지가 발생하면 온실 내 FCU로 냉수를 순환하여 잉여 열에너지를 회수하였고, CO₂ 발생기 작동 중에는 CO₂ 발생기 내 열교환기로 냉수를 순환하여 배기가스 열에너지를 회수 하였다. 히트펌프는 저온 축열조에 회수된 열에너지를 고온 축열조로 이동시켜 40 ~ 45℃의 온수를 만드는데 활용되었고 난방이 필요할 때 온실 내 FCU를 통하여 열에너지를 공급하였다. 복합 환경-에너지 제어 시스템은 회수되거나 공급된 열에너지량과 사용된 전기, LPG 량을 계측하여 실시간 에너지 사용량 모니터링 및 과거 사용량 일별, 월별 조회가 가능하도록 하였으며, 또한 에너지 사용량을 비용으로 환산할 수 있도록 하였다.

2. 시스템 성능 평가

히트펌프 시스템의 성능은 COP로 산출하였는데 콤프레셔 전력 소모만을 고려한 히트펌프 자체 COP는 가을철에 2.89 ~ 5.03으로 평균 3.51로 확인되었고 물펌프 등의 전력 소모까지 고려한 시스템 COP는 1.58 ~ 3.19로 평균 2.33이었다. 겨울철에는 히트펌프 자체 COP가 3.53 ~ 4.95, 평균 4.24로 확인되었고 시스템 COP는 1.44 ~ 3.55, 평균 2.90이었다.

연소식 CO₂ 발생기는 해가 뜬 이후부터 4시간 동안 1000 ~ 1500 ppm의 CO₂ 공급 목표를 달성하였고, 배기가스 열에너지 회수 효율은 평균 0.549로 확인되었다. 실제로 하루 4시간 CO₂ 공급에 2.3 ~ 3.3 kg의 LPG가 소모되었고 회수된 열량은 200,000 kcal 수준인 것으로 측정되었다. 특히 고온기에도 히트펌프 시스템과 연계하여 온실의 밀폐 상태를 유지한 채 1300 ppm 수준의 CO₂ 공급을 오전 3시간 동안 성공하였다.

온실 내 잉여 공기열 회수 결과 외기 온도가 영하로 떨어지지 않는 10월, 11월의 경우 하루 50,000 ~ 100,000 kcal 가량 잉여 열에너지가 회수될 수 있었지만, 가장 추웠던 1월의 경우 한 달 동안의 총 회수 열량이 68,000 kcal 수준 이었다

온실의 환경 제어는 야간에 난방 온도 15 ~ 20℃ 범위에서 성공적으로 수행되었고, 주간에는 25 ~ 27℃로 유지되었다. CO₂ 농도는 오전 7시 경부터 오전 11시 경까지 1300 ppm 수준으로 유지되었다. 겨울철 주간에 온실의 밀폐 상태를 유지할 수 있었기 때문에 상대 습도는 50 ~ 70%를 지속적으로 유지할 수 있었다. 보광은 오후 10시부터 다음날 새벽 5시까지 수행되었

으며 보온 스크린, 차광 스크린이 모두 자동제어 되었다.

3. 작물 재배 효과 및 에너지 절감 효과

중온기(가을철)의 시험작물 재배 결과 복합 환경-에너지 관리 온실(실험 온실)의 경우 관행 재배 온실(대조 온실)의 경우 보다 신초수는 0.5 ~ 1.9 개 많았으며, 꽃수는 1.4 ~ 3.2 개가 많아 상품성이 크게 향상되었음이 확인되었다. 저온기(겨울철)에는 품종별로 꽃수가 63 ~ 226 % 까지 증가한 결과를 확인하였고, 고온기(여름철)에는 신초수와 꽃수가 각각 31 ~ 60%, 56 ~ 119% 증가되었다.

관행재배 대비 복합 환경-에너지 관리 방식의 경우 가을철에 해당하는 11월에는 62 ~ 67%의 에너지 절감이, 겨울에 해당하는 12월과 1월에는 각각 9 ~ 62%, 44 ~ 71% 에너지 절감 효과가 있는 것으로 평가되었다. 경유의 가격이 상승한다거나 면세율이 낮아지게 되면 에너지 절감율은 더 높아져 본 시스템의 경제적 타당성이 더 높아질 것으로 판단된다.

4. 경제성 평가

온실 면적 0.1h 당 겨울철 4개월간의 운영비용은 복합 환경-에너지 관리 온실의 경우 약 850만원, 지열 활용 온실의 경우 220 ~ 540만원, 관행 온실의 경우 약 1330만원이 소요되었다. 하지만 지열 히트펌프 시스템의 설비비는 매우 고가이기 때문에 기계의 감가상각을 포함하여 비용을 산출해보면 복합 환경-에너지 관리 온실의 경우 약 1100만원, 지열 온실의 경우 810 ~ 1300 만원, 관행 온실의 경우 1830만원이 소요되는 것으로 분석된다. 결국 복합 환경-에너지 관리 온실의 비용과 지열 활용 온실의 비용은 크게 차이나지 않는 것을 확인되었고 관행 온실 대비 경제성은 매우 높은 것으로 평가되었다.

V. 연구성과 및 성과활용 계획

본 연구 과제 통하여 다수의 국내외 학술대회 발표와 전문학술지 논문 발표가 이루어 졌고, 주요 기술들과 관련된 3건의 특허가 출원 및 등록되었다. 또한 농진청에 영농활용이 채택 되었고 박사를 배출하는 등 다양한 연구성과가 있었다.

현재 심사중인 다수의 SCI 논문을 포함하여 연구 결과들을 저명 국제 학술지에 지속적으로 발표할 계획이고 참여 업체 및 관심 업체로 기술이전을 통하여 연구 결과를 실용화하고 농가 보급 사업을 진행할 계획이다.

S U M M E R Y

I . Title

Comprehensive Environment-Energy Management System for Energy Saving in Greenhouse

II . Purpose and necessity of the project

Hi-technology greenhouses which control complex environment such as temperature, humidity, carbon dioxide and light are increasing nowadays. However, complex environmental control needs large energy. Due to the increase of energy costs like soaring oil price, benefits of horticultural households have been deteriorated. Reducing the energy costs with complex greenhouse environmental control is necessary.

The greenhouse is a typical building to utilize solar energy, so greenhouse indoor temperature reaches the optimal temperature for plant growth without heating in the winter daytime. Indoor temperature often exceeds the optimal growth temperature (around 27°C) in the cold season, then the ventilation is required. If this indoor air thermal energy is recovered and applied for heating, environmental control and energy saving are achieved at the same time. Exhaust gas thermal energy from the combustion-type CO₂ generator and thermal energy from lighting systems are also recoverable thermal energy in greenhouses. Because these types of energy are closely related to environmental control, environmental control and energy management have to be conducted in interactional.

The objective of this project is to achieve both environmental control and energy management through development of an energy recovery - greenhouse indoor thermal energy, exhaust gas thermal energy and lighting energy - and use system for greenhouses and ubiquitous automation system for it. In addition, the objective of this project is applying developed system to a glass greenhouse and a plastic greenhouse and evaluating the energy saving effects and the plant growth improvement effects through growing test plants.

III. Contents and scope of the project

1. Development of a hybrid heat pump system

Because surplus thermal energy in greenhouses is low temperature energy source, it has to be converted to high temperature energy source. A heat pump system was developed for this purpose. The time that surplus thermal energy is generated vary according to the type of energy source, and the time for using recovered energy is not synchronized. Therefore, the heat pump system in heat storage type was developed for storing thermal energy. The high and low temperature heat storage tanks were equipped for cooling and heating. This heat pump system was developed to utilize hybrid heating sources - electric heater and ground water thermal energy.

2. Development of CO₂ generator recovering combustion heat

Carbon dioxide fertilization is usually conducted in the morning, but the greenhouse indoor temperature at this time is high enough. Therefore exhaust gas thermal energy from the combustion-type CO₂ generator has to be recovered and used for heating at night time. Developed CO₂ generator equipped heat exchangers to recover exhaust gas thermal energy, and these heat exchangers were connected to the heat pump system. Also, a CO₂ enrichment strategy that is prevent the ventilation during the CO₂ enrichment duration was developed and realized to the system. This becomes a CO₂ enrichment system.

3. Development of ubiquitous environment-energy management and control system

Environmental control, energy consumption and surplus energy generation interact, thus desired environmental control conditions and the individual environmental control devices are organically combined, and the interaction control logic is developed. Based on this system, environmental control and energy management could be achieved at the same time. The individual environmental control devices include the heat pump system, the CO₂ generator, supplemental lighting, ventilation device, thermal and light screen. The remote control system was developed, so energy monitoring and control are possible through the Internet and the smartphones.

4. Effect analysis of plant growth improvement using developed system

In order to analyze the effects of environmental control and energy saving, test plants grew in a glass greenhouse and a plastic greenhouse. In the glass greenhouse, roses in pots

- warm climate plant - were grown, and in the plastic house, cymbidium - cold climate plant - were grown. Growing experiments in the conventional greenhouse using the boiler was also conducted. Based on the operation comparison of developed system and the conventional system, the effects of plant grow improvement and energy saving were analyzed.

IV. Results of the project

1. System Development

A hybrid heat pump system including the high and low heat storage tanks, LPG combustion-type CO₂ generator recovering exhaust gas thermal energy and an ubiquitous environment-energy control system connected to the Internet and the smartphones were developed. Heat fluid contained in the heat storage tanks was ground water. Several FCUs were installed in the greenhouse for supplying and recovering air thermal energy. Especially some FCUs were installed to upper place of the greenhouse (gable) to efficiently recover air thermal energy at upper area. High pressure sodium lamps were set for supplemental lighting. Environment-energy control system was manufactured using 8 bit MCU. A board in this system controls and communicates individual environmental control devices and machinery. This board also works to measure and record environment and energy element. Controlling and monitoring were conducted through the web server and programs.

Cold water (10 ~ 15°C) was contained in the low temperature heat storage tank, and this water is circulated through FCUs in the greenhouse and used to recover surplus air thermal energy in the greenhouse. During CO₂ generator operation, this cold water is circulated through the heat exchangers in the greenhouse, then exhaust gas thermal energy is recovered to the heat storage tanks. The heat pump works to move thermal energy from the low temperature heat storage tank to the high temperature heat storage tank. Warm water in the high temperature heat storage tank becomes 40 ~ 45°C, and is used for heating. Heating energy is supplied through FCUs in the greenhouse. The environment-energy control system measures the amount of energy supplied and recovered, and the consumption amount of electricity and LPG, and shows in real time. Energy consumption amount and its cost are listed daily and monthly.

2. Performance evaluation of the system

The performance of the heat pump system was evaluated using the coefficient of performance (COP). In the fall, The COP of the heat pump considering only the compressor electricity consumption was calculated between 2.89 and 5.03. Its average was 3.51. When the electricity of pumps and etc. was considered, the COP of the heat pump system was 1.58 ~ 3.19, and its average was 2.33. In the winter, the heat pump showed 3.53 ~ 4.95 of COP, and its average was 4.24. The COP of the heat pump system was 1.44 ~ 3.55, and its average was 2.90.

The combustion-type CO₂ generator was successfully operated for 4 hours at 1000 ~ 1500 ppm. The efficiency of exhaust gas thermal energy recovery was identified as 0.549. When CO₂ was supplied as this concentration level, 2.3 ~ 3.3 kg of LPG was consumed and the amount of recovered thermal energy was measured as approximately 200,000 kcal. The CO₂ generator was operated in the hot season. The greenhouse could maintain no ventilation condition, and the greenhouse indoor concentration was controlled as approximately 1300 ppm for 3 hours in the morning.

As a results of recovering surplus air thermal energy in the greenhouse, 50,000 ~ 100,000 kcal/day was recovered in October and November when outside temperature was higher than 0°C. However, the amount of thermal energy recovered in January (the coldest month) was approximately 68,000 kcal.

Temperature of the greenhouse was successfully controlled at 15 ~ 20°C at night time, and 25 ~ 27°C at daytime. CO₂ concentration was maintained at 1300 ppm from 7 am to 11 am. Because the greenhouse could retain the closed condition, the relative humidity of the greenhouse inside was maintained in 50 ~ 70%. Supplemental lighting was operated from 10 pm to 5 am, and thermal and shading screens were automatically controlled.

3. Effects of plant growth and energy saving

In the moderate season (fall), the number of new branches in the environment-energy management greenhouse was 0.5 ~ 1.9 more than that in the conventional greenhouse. The number of flowers in the environment-energy management greenhouse was 1.4 ~ 3.2 more than that in the conventional greenhouse. In the cold season (winter), the number of flowers was raised in 63 ~ 226% according to species. In the hot season (summer), the numbers of new branches and flowers were increased by 31 ~ 60% and 56 ~ 119%, respectively.

The environment-energy management method gave 62 ~ 67% of energy saving in November, and 9 ~ 62% in December and January compared with the conventional method. If the oil price or the oil tax increase more, the economic feasibility of this system

will be improved higher.

4. Economic feasibility

Operating costs for 4 months in the winter were estimated as 8,500,000 won/0.1h for the environment-energy management greenhouse, 2,200,000 ~ 5,400,000 won/0.1h for the geothermal application greenhouse, and 13,300,000 won/0.1h for the conventional greenhouse. However, when the depreciation costs of the machinery are considered, the costs for the environment-energy management greenhouse and the geothermal application greenhouse were estimated as 11,000,000 won/0.1h, and 8,100,000 ~ 13,000,000 won/0.1h. In the case of the conventional greenhouse, their costs would be 18,300,000 won/0.1h. Accordingly economic feasibility of developed system and geothermal application system operations becomes similar, and economic feasibility of developed system was very high compared with the conventional greenhouse.

V. Research outcomes and plans for utilization

Many international and domestic conference papers and journal papers were published through this project. Three patents related to the core technology of this project were applied or registered. Also, an agricultural application was proposed, and one Ph.D. was produced.

Additional research results will be published to famous international journal as papers, of which were now being reviewed.

Developed systems will be commercialized through technology transfer to the project-involving companies or the companies interesting in this technology, and distributed to agricultural fields.

CONTENTS

Chapter 1 Introduction	21
Section 1 Necessity of the project	21
1. Necessity of utilization of surplus air thermal energy in greenhouses	21
2. Necessity of integration of greenhouse environmental control and energy management	22
3. Productivity improvement of greenhouses using the comprehensive environment and energy control system	23
Section 2 Purpose and goal of the project	24
Section 3 Scope of the project	25
1. Development of a hybrid heat pump system using surplus thermal energy in greenhouses	25
2. Development of a CO ₂ generator recovering its exhaust gas thermal energy	26
3. Development of a ubiquitous environment-energy management control system	27
4. Investigation of the effects of plant growth improvement using developed system	28
Chapter 2 Current state on research and development	29
Section 1 Current state on research	29
1. Domestic state	29
2. Abroad state	29
Section 2 Current state on patents	30
Section 3 Current state on products	30
1. Domestic products and markets	30
2. Abroad products and markets	31

Section 4	Position of the research results in research and development areas	32
Chapter 3	Contents and results of the project	34
Section 1	Basic concept design	34
1.	Investigation of energy consumption levels of conventional greenhouses	34
2.	Energy consumption pattern of rose greenhouses in the winter	34
3.	Concept design of the hybrid heat pump for greenhouses	36
4.	Concept design of the CO ₂ generator recovering its exhaust gas thermal energy ..	40
5.	Concept design of the ubiquitous greenhouse environmental control system	42
Section 2	Basic experiment	44
1.	Precision measurement method of temperature and humidity in the greenhouse environment	44
2.	Development of the ventilation-type solar radiation shield	48
Section 3	Development of environment management machines for energy saving	53
1.	Development of the hybrid heat pump system	53
2.	Development of the CO ₂ generator recovering its exhaust gas thermal energy	59
3.	Development of the ubiquitous greenhouse environmental control system	63
Section 4	Installation of the greenhouse environment-energy management system	92
1.	Plan for experimental greenhouse installation	92
2.	System composition	93
3.	Application of the ventilation-type solar radiation shield	98
4.	Set-up of measuring devices for the performance evaluation of the greenhouse environment-energy management system	99
5.	Found problems of the greenhouse environment-energy management system and their improvement	103
Section 5	System performance evaluation	110
1.	Heat pump system	110
2.	CO ₂ generator recovering its exhaust gas thermal energy	121
3.	Performance evaluation of surplus thermal energy recovery from solar radiation ..	127
4.	Overall performance evaluation of the greenhouse environment-energy management	

system	130
5. System performance evaluation in the hot season	132
Section 6 Comparative analysis of energy and environment between the greenhouse environment-energy management greenhouse and the conventional greenhouse	137
1. Comparison of the environmental control devices and methods	137
2. Comparison of temperature and humidity	138
3. Comparison of the environment according to opening and closing windows	141
Section 7 Economic evaluation of the environment-energy management greenhouse	142
1. Installation costs evaluation	142
2. Operation costs evaluation	142
3. Economic evaluation of CO ₂ enrichment in the hot season	145
4. Economic comparison with the greenhouse using the geothermal energy	146
Section 8 Field evaluation	151
1. Field greenhouse conditions and facilities	151
2. Development and installation of the greenhouse environment-energy management system for the field test	152
3. Field test results	162
Section 9 The effects of the plant growth improvement using the system and economic feasibility	170
1. Effects in the moderate season and economic feasibility	170
2. Effects in the cold season and economic feasibility	175
3. Effects in the hot season and economic feasibility	181
Section 10 The effects of the plant growth improvement using the system and economic feasibility through operating the field system	190
1. Outline	190
2. Effects of plant growth improvement	191
3. Environmental control results	192
4. Economic feasibility of the environment-energy management greenhouse in field	193

Chapter 4 Achievement of the goal and contribution on the relative areas	196
1. Yearly research goals and achievement	196
2. Contributions to technology advance of the relative areas	198
Chapter 5 Research outcome and plans for utilization	200
1. Research outcomes	200
2. Plans for utilization of research outcomes	201
Chapter 6 Science and technology information collected during the research process	204
1. Program for greenhouse heating load calculation	204
2. Energy management technology for huge greenhouses	204
3. Energy saving technology for greenhouse cooling and heating using a ground heat storage tank system	205
4. Summery of abroad relative academic papers	206
Chapter 7 References	215
Appendix 1 Program code for environment-energy management algorithm	221

목 차

제 1 장	연구개발과제의 개요	21
제 1 절	연구 개발의 필요성	21
1.	온실 내 잉여 공기열 에너지의 활용의 필요성	21
2.	온실의 환경 제어 및 에너지 관리 통합의 필요성	22
3.	복합 환경 및 에너지 제어 시스템 온실을 이용한 생산성 향상	23
제 2 절	연구 개발의 목적 및 목표	24
제 3 절	연구 개발의 범위	25
1.	온실의 잉여 열에너지를 이용하는 하이브리드 히트펌프 시스템 개발	25
2.	연소열 회수형 이산화탄소 공급기 개발	26
3.	유비쿼터스 복합 환경-에너지 관리 제어 시스템 개발	27
4.	개발된 시스템을 이용한 식물 생육 개선 효과 분석	28
제 2 장	국내외 기술개발 현황	29
제 1 절	국내외 연구 현황	29
1.	국내 연구 현황	29
2.	국외 연구 현황	29
제 2 절	국내외 특허 현황	30
제 3 절	국내외 제품화 현황	30
1.	국내 제품생산 및 시장 현황	30
2.	국외 제품생산 및 시장 현황	31
제 4 절	연구 결과가 국내외 기술개발에서 차지하는 위치	32

제 3 장	연구개발수행 내용 및 결과	34
제 1 절	기초 개념 설계	34
1.	관행온실의 에너지 사용수준 파악	34
2.	겨울철 장미 온실의 지역별 에너지 사용 패턴 조사	34
3.	온실용 하이브리드 히트펌프 시스템 개념 설계	36
4.	연소열 회수식 CO ₂ 발생기의 개념 설계	40
5.	유비쿼터스 온실통합제어 시스템의 개념 설계	42
제 2 절	기초 실험	44
1.	온실 환경에서 정확한 온·습도 데이터 측정 방법	44
2.	강제 통풍식 온실내 온도 측정 장치의 개발	48
제 3 절	에너지 절약형 환경 관리 기계 개발	53
1.	하이브리드 히트펌프 시스템의 개발	53
2.	배기가스열 회수식 이산화탄소 발생기 개발	59
3.	유비쿼터스 에너지 통합 관리 시스템의 개발	63
제 4 절	복합 온실 환경-에너지 관리 시스템 설치	92
1.	실험 온실 설치 계획	92
2.	시스템 구성	93
3.	정확한 건구 온도 계측을 위한 강제 통풍식 복사열 차단 장치 적용	98
4.	복합 온실 환경-에너지 관리 시스템의 성능평가 측정 장치 설치	99
5.	에너지 통합 관리 시스템의 문제점 파악 및 개선	103
제 5 절	시스템 성능 평가	110
1.	히트펌프 시스템	110
2.	연소열 회수식 CO ₂ 발생기	121
3.	태양복사 에너지에 의한 잉여열 회수 성능 평가	127
4.	복합 환경-에너지 관리 시스템의 종합 성능 평가	130
5.	고온기 시스템 성능 평가	132
제 6 절	복합 환경-에너지 관리 온실과 관행 방식 운영 온실의 에너지 및 환경비교 분석	137
1.	환경 제어 설비와 제어 방식 비교	137
2.	온습도 환경 비교	138

3. 창 폐 폐 여부에 의한 환경 비교	141
제 7 절 복합 환경-에너지 관리 시스템의 경제성 평가	142
1. 설비 비용 평가	142
2. 운영 비용 평가	142
3. 고온기 이산화탄소 공급의 경제성	145
4. 지열 이용 온실과의 비교를 통한 경제성 평가	146
제 8 절 현장 평가	151
1. 현장 평가 온실의 현황 및 설비 구조	151
2. 현장 평가용 개별 장치 개발 및 시스템 구성	152
3. 현장 평가 결과	162
제 9 절 시스템 활용에 따른 식물 생육 개선 효과와 경제성	170
1. 중온기 효과와 경제성	170
2. 저온기 효과와 경제성	175
3. 고온기 효과와 경제성	181
제 10 절 현장 온실의 시스템 운영에 따른 생육 개선 효과와 경제성	190
1. 개요	190
2. 작물의 생육 개선 효과	191
3. 환경 제어 결과	192
4. 복합 환경-에너지 관리 온실의 현장 실험에 따른 경제성 평가	193
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	196
1. 연도별 연구목표 및 달성도	196
2. 관련분야의 기술발전예의 기여도	198
제 5 장 연구개발 성과 및 성과활용 계획	200
1. 연구 개발 성과	200
2. 연구 성과 활용 계획	201
제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	204
1. 온실 난방 부하 산출 프로그램	204
2. 초대형 온실 에너지 관리 기술	204

3. 지하 축열조 시스템을 이용한 온실 냉난방 에너지 절감 기술	205
4. 해외 관련 학술 논문 요약	206

제 7 장 참고문헌 215

참고자료 1. 복합 환경-에너지 관리 알고리즘을 구현한 프로그램 코드	2
---	---

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구 개발의 필요성

1. 온실 내 잉여 공기열 에너지의 활용의 필요성

우리나라의 평균적인 태양광 복사에너지 분포는 아래 그림 1과 같이 지역에 따라 차이가 있다. 최고 관측치는 평방미터당 하루에 3,400 kcal이다. 하지만 계절별 일조시간의 변화와 대기 오염으로 인하여 도시와 농촌, 지역적인 기상특성의 영향을 받지만 농촌지역은 적게 평가하여도 평방미터당 하루에 2,000 kcal 이상이 시간당 지면에 도달한다.

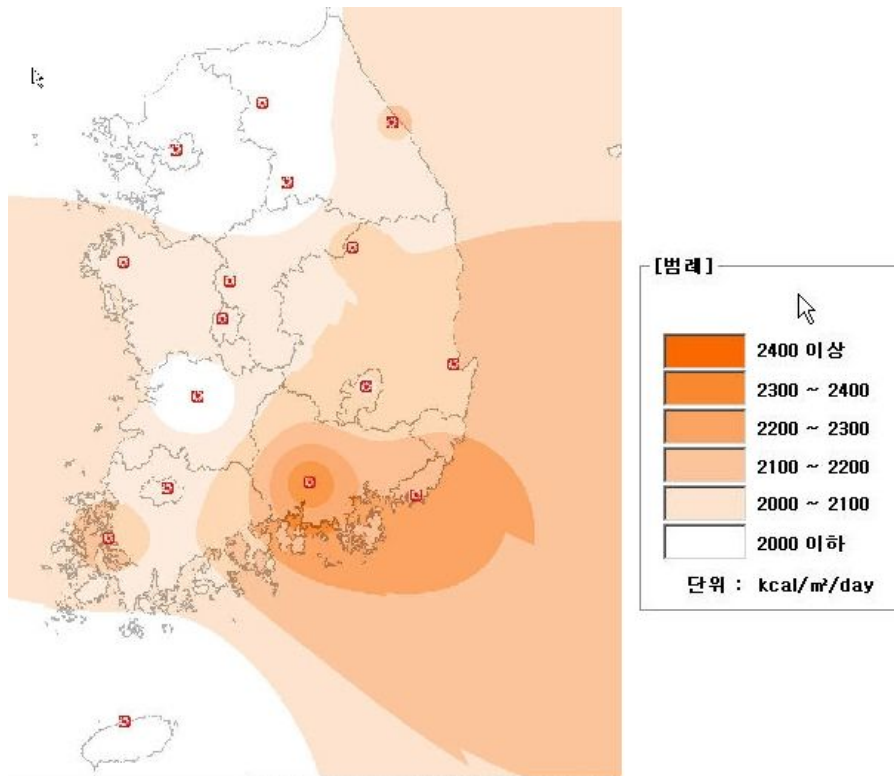


그림 1. 우리나라의 태양광 복사에너지의 지역별 분포

위와 같이 막대한 복사에너지 때문에 유리온실이나 비닐하우스에서는 겨울철에도 해가 뜨면 내부온도가 30℃ 이상으로 쉽게 올라간다. 겨울철에도 창문을 열지 않을 경우에 온실 내부의 온도는 고온성 작물에도 적합하지 않는 고온 조건이 도달한다. 온실 내부의 공기는 온도차에 따른 공기밀도의 변화로 인하여 뜨거운 공기는 위로 모이고 차가운 공기는 아래로 모이기 때문에 이 에너지를 회수하여 활용한다면 유용한 에너지원이 될 수 있다.

2. 온실의 환경 제어 및 에너지 관리 통합의 필요성

시설원예가 국제경쟁력을 가지려면 생력화와 경제성은 물론이고 에너지절약형 고품질 생산 시설을 갖추어야 한다. 우리나라에 보급되고 있는 온실 환경 제어는 외부기상과 연계하여 냉난방과 측창이나 천창을 개폐를 통한 환기, 보광과 차광, 보온스크린, 이산화탄소 공급기를 작동시키는 것이 가능하다. 하지만 최근에는 환경 제어를 얼마나 정확하게 수행하는가에서 나아가서 저렴한 비용으로, 그리고 지속가능한 에너지를 이용하여 수행할 수 있는가에 대한 관심이 높아지고 있다.

온실의 냉난방, 보광, 이산화탄소 공급 등의 환경 제어는 온실 내 온도, 습도, 일조량 등과 밀접히 관계된 것으로 에너지를 최소한으로 소모하며 환경 제어 목적을 달성하기 위해서는 온도계, 이산화탄소 농도계, 일사량계와 같은 각종 센서와 통합되어야 할 필요가 있다. 이러한 통합적 환경제어는 생력화를 위해서도 중요하다. 또한 각종 환경 제어 장치들의 상호 작용을 이해하여 중복되는 효과와 서로 배치되는 효과들을 분석하여 효과적으로 운영하는 것이 필요하다. 다음 그림 2은 환경 제어 및 에너지 관리 통합의 필요성을 도시한 것이다.

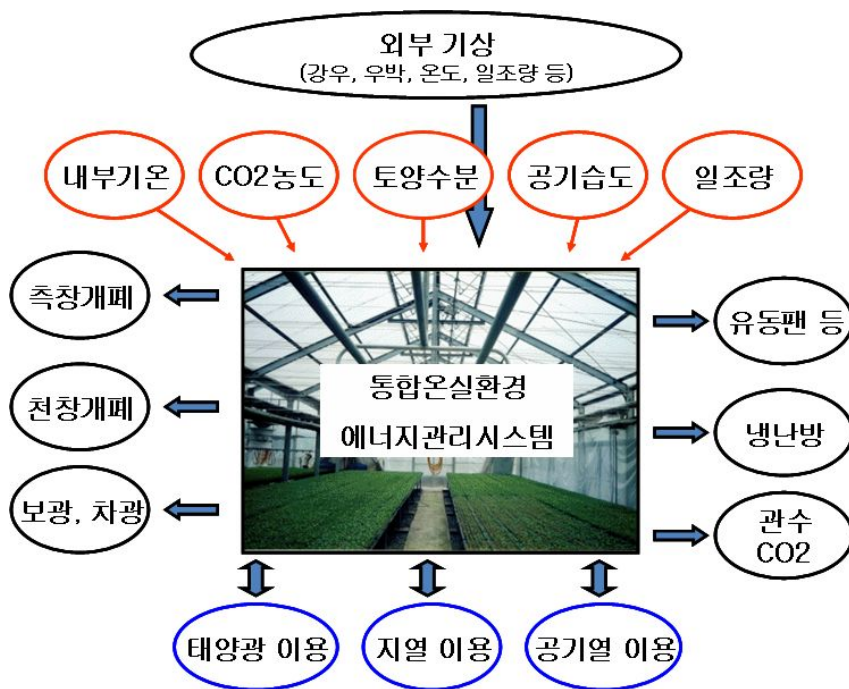


그림 2. 복합온실환경에너지관리 시스템의 필요성

3. 복합온실 환경 및 에너지 제어 시스템을 이용한 생산성 향상

현재 농가들은 여러 가지 환경 제어 설비 들을 다양한 조합으로 활용하고 있는데, 히트펌프만 설치한 경우, 보광과 CO₂ 공급기를 갖춘 농가를 연구에서 목표로 하는 시스템을 갖춘 농가와 비교하면 아래 표 1과 같이 비교된다. 현재 농가에 보급되어 있는 자동화설비를 보면 외국 제품, 국산제품으로 나뉘며 신뢰도 측면에서 볼 때 외국제품이 선호되는 실정이다. 선호하는 이유는 안정성 및 기초 자료가 많기 때문이다. 또한 작물재배 기술은 농가의 경험에 의존하는 실정이어서 생산성 또한 저조하다. 자동화설비를 한 경우에도 기술의 종합적 도입이 아닌 한 부분(예: 보광)만 적용하다보니 생산성의 향상에 한계가 있다. 따라서 복합 환경 제어와 동시에 에너지 절감을 달성하여 생산성 향상의 증대를 최대화 할 수 있을 것이다.

표 1. 시설 원예 농가에 설치된 환경 제어 장비와 생산성 비교

1 ha 기준	온도 / 습도	CO ₂ 량	광량	연료비	생산성
기존농가	온도상승시 열림 하강시 닫음 습기 상승시 창 열림	700ppm CO ₂ 봄베 공급	태양광 전기사용량:30kw	경유-200 ℓ	기준
히트펌프만 설치농가	온도상승시 회수 장치 가동 회수 하강시 열원 공급	700ppm CO ₂ 봄베 공급	태양광 전기사용량:60kw	경유- 100 ℓ	상동
보광/CO ₂ 만 설치농가	온도상승시 열림 하강시 닫음 습기 상승시 창 열림 평균 8000LUX	1000ppm LPG보일러에서 공급	보광등 야간 4시간기준, 전기사용량 200kw	LPG대체	약 20% 향상
종합적인 시스템 (연구목표)	온도/습도에 의한 자동화시스템 가동 자동조절	1000ppm LPG보일러에서 공급	보광등(야간 4시간) 평균8000 LUX 전기사용량 260kw	경유 대신 LPG대체	약 50% 향상
비교	종합시스템 설치로 온실 최적화를 만 들	1000ppm=1g/L LPG에서 3배의 CO ₂ 를 공급 가능	야간 광합성시 CO ₂ 공급필요	연료비 특히 경유의 소비가 현저히 감소	종합시스템 시설확충 필요

제 2 절 연구 개발의 목적 및 목표

본 연구 목적은 생산비 절감과 품질 향상을 위하여 개발되어온 기술 개발의 경험과 새로운 저탄소 녹색기술을 하나의 시스템으로 통합하여 온실에 접목하여 투입 에너지의 대폭적인 절감(투입에너지를 신재생에너지로 대체)과 이산화탄소의 배출 및 낭비를 줄이고, 재배기간 단축을 통한 생산비 절감과 복합 환경 제어를 통한 생력화, 유비쿼터스 기술을 이용한 시스템의 편리성과 안정성 향상을 도모하는 것이다.

아래 그림 3은 이와 같은 목적을 개략적으로 표현한 것으로 복합환경에너지관리 시스템의 범주에 포함되는 구성을 보여준다. 식물의 생육 원리를 바탕으로 온도, 습도, 광, 이산화탄소 관리를 위한 복합 환경 제어 장치가 구비되고 에너지 절감을 위한 히트펌프 시스템 및 온실 자동화 시스템이 포함된다. 결과적으로 에너지 절약, 이산화탄소 배출 감소, 생육기간 단축을 동시에 달성할 수 있다.

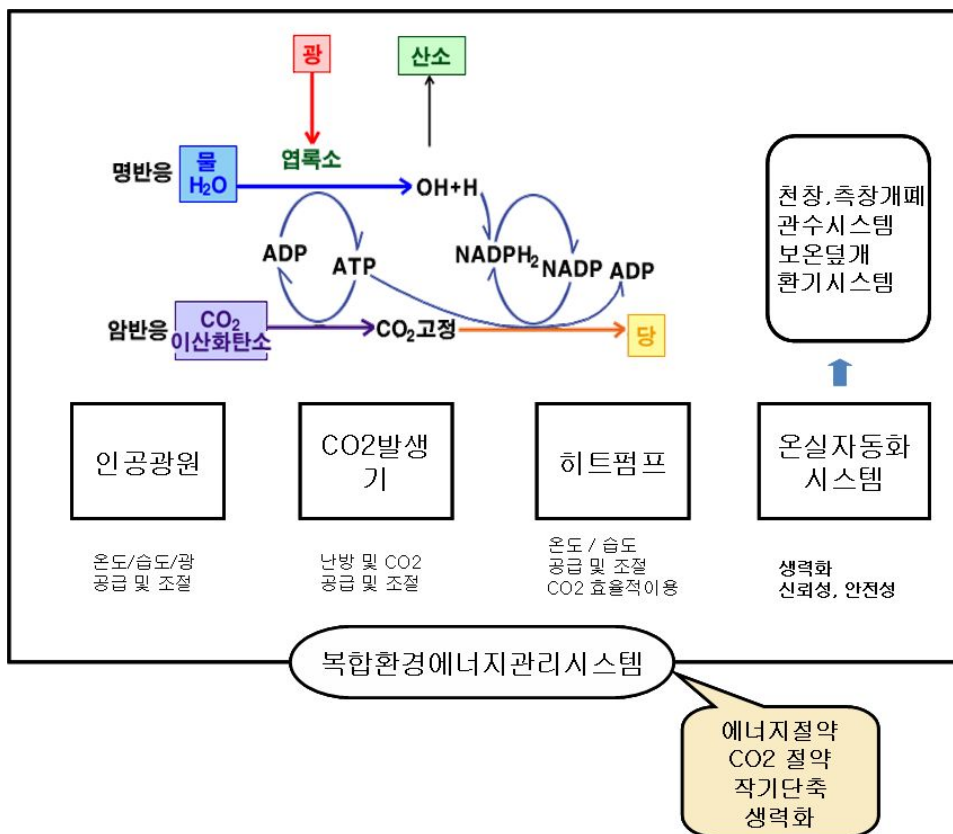


그림 3. 복합환경에너지관리 시스템의 개념

제 3 절 연구 개발의 범위

1. 온실의 잉여 열에너지를 이용하는 하이브리드 히트펌프 시스템 개발

개발하고자 하는 온실용 하이브리드 히트펌프 시스템은 온실의 잉여 공기열에너지를 회수하고 히트펌프를 이용하여 온실의 난방에너지에 활용할 수 있는 시스템이다. 잉여 공기열이 부족한 극한 기상을 대비하여 부족한 열원은 지하수열 또는 보조 난방기를 설치하여 하이브리드로 작동하고자 한다. 겨울철에는 잉여 공기열에너지를 회수하여 축열하고 난방에 이용하며, 기상에 따른 부족분은 평균적으로 15℃를 유지하는 지하수열에서 공급 받고, 지하수가 부족한 지역에서는 보조 난방기를 이용한다. 여름철에는 상대적으로 저온인 야간에 히트펌프를 이용하여 저온수를 대량으로 확보하여 이산화탄소를 공급하는 오전시기에 온실의 창문 개방방지를 위하여 냉방에너지로 집중 활용하게 된다.

히트펌프는 냉매 압축기, 응축기, 증발기, 팽창기를 주요 구성원으로 하고 일반적인 냉방이나 난방에 비해 에너지 효율이 높으며 3방 또는 4방 밸브를 이용하여 작동회로를 변경하면 냉방과 난방을 겸할 수 있다. 일찍이 산업화되어 있으며 농업에서 활용은 최근에 각광을 받고 있으나 농업에 활용하고자 하는 연구도 활발히 진행되고 있다.

본 연구에서 개발하고자 하는 히트펌프시스템은 온실 내부의 잉여 공기열 에너지를 이용한다는 점에 기존의 연구와 다른 독창성이 있다. 그림 4은 본 연구에서 개발하고자 하는 히트펌프의 원리도이다. 이 히트펌프 시스템은 열원으로 수열과 공기열을 동시에 이용하고, 연소식 CO₂공급기, 보광 장치와 연동되어 난방에너지 절감 효과가 증가된다.

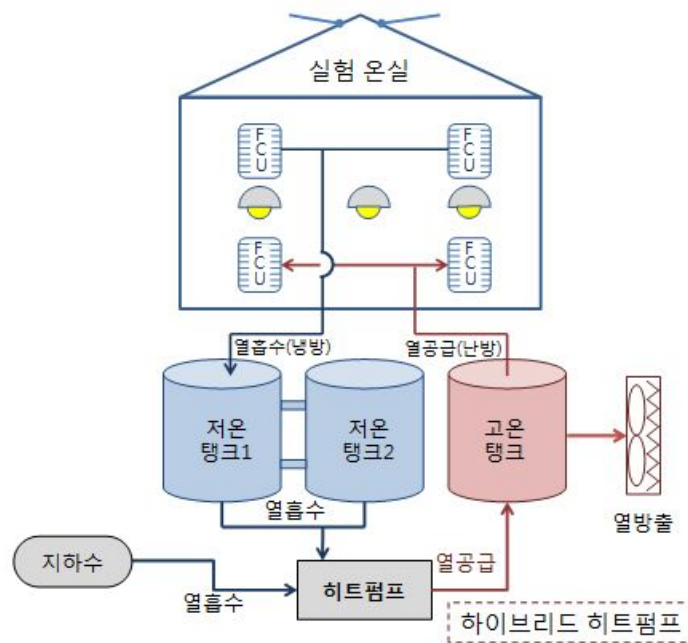


그림 4. 하이브리드 히트펌프 시스템의 구성

2. 연소열 회수형 이산화탄소 공급기 개발

LPG는 가정용 연료로서 실내에서 사용되어도 인간에게 거의 해를 미치지 않을 만큼 청정한 연료이지만 불완전 연소시에는 오염물질이 나올 수 있으므로 초기 또는 소화직후에는 실내에 연소가스를 공급해서는 안 된다.

그림 5는 개발하고자 하는 LPG 난방 겸 이산화탄소 공급기 개발의 시스템 구성도로서 활용 원리를 보여준다. LPG를 연소할 때는 외부의 신선한 공기를 음압으로 유입하여 완전연소가 되도록 한다. 이 때 연소 가스는 300℃가 넘는 고온이므로 물을 이용하여 90℃ 이하로 낮춰지도록 저온 축열조 순환 펌프를 작동시키며 배기 가스열을 회수하여 저장한다. 연소가스로부터 이산화탄소를 얻어도 되는지 여부는 연소가스 중에 일산화탄소 농도 존재 여부로 판단되어야 한다. 만약 불완전 연소인 경우에는 연소가스를 온실 밖으로 배출하고, 완전연소가 됐다고 판단될 때에 온실 내부로 배출하도록 한다. 이때, 실외 공기 유입을 통하여 연소가스와 혼합하고 온실 온도와 비슷한 온도로 온실 내에 공급한다.

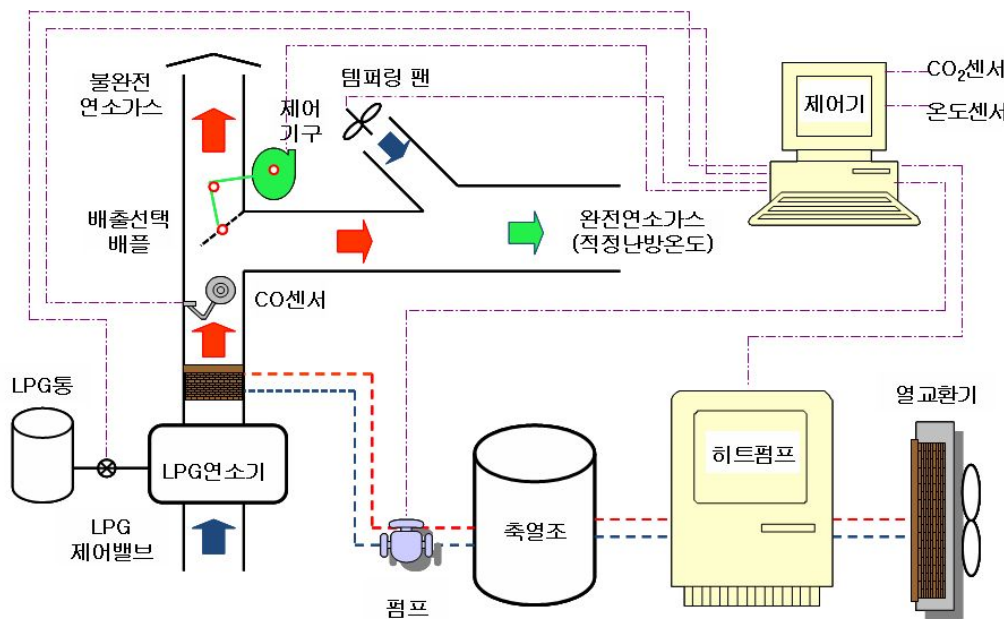


그림 5. LPG 난방 및 이산화탄소 공급기 시스템 구성도

연소열 회수형 이산화탄소 공급기의 작동시간은 온실 내부의 CO₂센서와 온도센서에 의해 결정되며, 이산화탄소 공급을 중단할 때에는 배출선택밸브를 먼저 작동하여 온실 내 공기유입을 차단하고 LPG연소기를 소화시킨다. 저장된 배기가스 열에너지는 에너지통합제어 시스템의 판단에 의하여 난방이 필요할 때, 온실 내 설치된 다수의 열교환기를 통하여 난방에 이용된다.

3. 유비쿼터스 복합 환경-에너지 관리 제어 시스템 개발

본 연구에서 개발하고자 하는 온실용 하이브리드 히트펌프 시스템과 연소열 회수식 이산화탄소 공급기는 온실 내 온도, 습도, 일조량 등과 밀접히 관계된 것으로 목적을 달성하기 위해서는 온도계, 이산화탄소 농도계, 일사량계와 같은 각종 센서와 통합되어야 할 필요가 있다. 또한 우리나라는 IT의 강점을 살려서 온실용 유비쿼터스 시스템을 개발하고 보급 초기에 있다. 유비쿼터스 시스템은 온실 내 환경제어를 위한 시스템과 외부의 웹과 연계되고 원격 모니터링과 제어가 가능한 시스템인데, 하드웨어 측면에서 보자면 온실 내부에 장착되는 각종 기계류와 제어시스템 간에 밀접한 관련성이 있다. 통합제어시스템은 불가피하게 기존에 가용한 제어장치와 이를 제어하기 위한 프로토콜을 필요로 하는데 최근 녹색성장의 필요성에 따라 시설원예에서 지열을 이용하거나 지하수 열 등 자연에너지를 이용하는 기술이 많이 개발되고 있다. 본 연구와 같이 공기열을 이용하는 기계시설이 개발되었다 하더라도 기존에 개발된 유비쿼터스 시스템에서 이를 통합적으로 운영할 수가 없다. 자연에너지를 활용하는 기술이 보급되었다 하더라도 기존 시스템에서 통합되지 않는다면 농업인은 여러 시스템을 비효율적으로 관리할 수밖에 없고 유비쿼터스 시스템의 활용에도 한계가 생긴다. 따라서 새롭게 개발되는 에너지절약형 시설과 기계를 기존의 시스템을 보완하고 통합하여 농업현장에 적응성을 높여 실용화를 단축하고 촉진하고자 한다. 다음 그림 6는 개발하고자한 복합 온실 환경 에너지 관리 제어 및 통신시스템의 개략적인 구성을 보여준다.

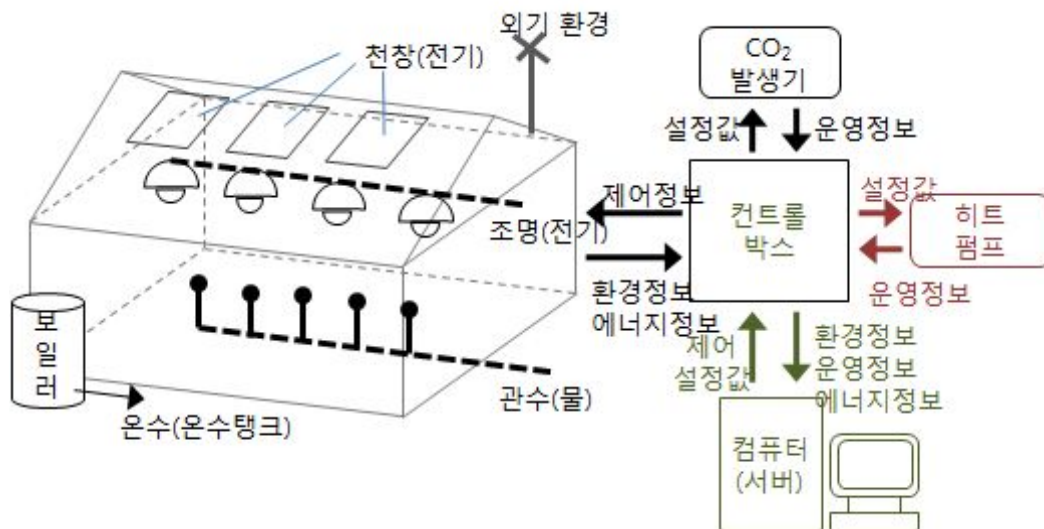


그림 6. 복합 온실 환경 에너지 관리 제어 및 통신시스템의 구성

4. 개발된 시스템을 이용한 식물 생육 개선 효과 분석

에너지 절약형 복합 환경-에너지 관리 시스템이 개발 되면 이를 이용하여 식물 생육을 수행하여 생육 개선 효과를 분석한다. 기존 온실과 복합 환경-에너지 관리 온실의 작물 재배 특성 분석은 소형 유리 온실과 현장 비닐하우스에서 수행을 하는데 소형 유리 온실에서는 다양한 품종의 분화 장미를 대상으로 생육 효과를 분석하였고, 현장 비닐하우스에서는 심비디움을 대상으로 생육 효과를 분석하였다. 주요 환경 제어 요소로는 온도, 습도, 이산화탄소, 보광으로 선정하였다. 품질평가는 화훼시장의 품질평가 기준 적용하였고 그 대상은 신초수, 개화수, 지상부·지하부 무게 등으로 선정하였다.

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내외 연구 현황

1. 국내 연구 현황

에너지 환경관리 시스템 구축을 위한 기초 연구로써 토마토 재배시설 구조의 표준화, 규격화 및 구조적 안정성을 확보하고, 체계적인 환경관리를 통해 동절기 난방비 절감 및 하절기 온실 활용도 제고 그리고 토마토의 품질 및 수량증가 등을 목표로 토마토 재배시설의 표준모델 개발을 위한 기초자료를 제공하기 위한 연구가 수행되었다(남상운과 김영식, 2009). 유리 온실 시설의 연간 냉난방 부하 및 에너지 시뮬레이션에 관한 연구의 경우 국제 표준 규약 IPMVP(International Performance Measurement Verification Protocol) 4.4.2에 근거하여 온실 내 난방부하를 시간별로 계산하고 이를 매시간 별로 시뮬레이션 하였다. 이 연구는 본 과제에 있어서도 정확한 부하계산과 이에 따르는 기기선정의 측면에서 매우 중요하므로 고려되었다(장재철 등, 2009). 온실내 회수된 잉여열을 활용하여 작물에 투입되는 양액을 가온하는 시스템 연구가 수행되었다. 특히 겨울철의 경우 작물에게 공급되는 양액의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 많은 에너지를 소모하고 있는 만큼 잉여열의 좋은 활용방법이 될 것으로 보인다(백이 등, 2010). 온실의 온도, 습도, 산소, 이산화탄소부터 유해가스인 암모니아, VOC가스 등을 측정하기 위한 무선 센서 노드와 이들 가스의 복합적 환경에서 각 대상 가스별 농도추정 기능을 하는 가스분석 소프트웨어로 이루어진 무선 자동측정시스템이 연구 되었다. 이는 본 과제에서 온실 내부의 모니터링 시스템 구축과 연관성이 있다(김영웅 등, 2010).

2. 국외 연구 현황

피복재의 건·습상태와 보온커튼 유무에 따른 총열전달계수를 온도차와 풍속에 대한 함수로 나타내는 연구가 수행되었는데 온실내부의 상태를 기술하기 위하여 필요한 연구이다(Geoola et al., 2009). 터키지역에서 EurepGAP의 기준으로 재배했을 때와 그렇지 않을 때의 실제 에너지 소비의 차이 비교. EurepGAP의 기준이 얼마나 잘 맞는지 비교한 연구도 수행되었다(Bayramoglua and Gundogmus, 2009). 최적의 온실 환경을 구축하기 위한 연구 중에는 온실의 구조물 형태에 따라서 에너지 소비에 차이가 있는지에 대한 연구가 수행된 바있다(Djevic and Dimitrijevic, 2009) 온실내 냉방시스템을 위하여 쿨링패드 방법중 그 지역에서 사용되는 3 가지 방식의 쿨링패드 방식을 비교한 연구가 수행되었다. 현 과제의 시스템에서도 한 여름 무더위에는 활용에 한계가 있을 수 있는데, 열회수 시스템에 증발열을 이용한 냉방시스템을 이용할 경우 한 여름에도 창 개폐없이 효율적으로 더위를 잡을 수 있을 것으로 보인다(Ahmeda et

al., 2011). 온실내 설치된 센서들간의 통신의 경우 유선 시스템을 사용하는 경우 단점이 발생하기 때문에 Zigbee 시스템을 이용한 무선 통신 네트워크 시스템을 구축하였다(Song, 2010).

제 2 절 국내외 특허 현황

LPG 난방 겸 이산화탄소공급기와 가장 가까운 특허는 탄산가스배출 겸용 간접열식 LPG온풍기(특2001-0016880)였다. 이 특허는 탄산가스배출 겸용 간접열식 LPG온풍기로서 LPG를 연소하고 발생하는 열을 열교환기를 거쳐 온실의 난방에 이용하고 배기되는 탄산가스는 배기연통에 설치한 탄산가스공급기를 통하여 온실 내로 유입하여 작물의 탄소동화작용을 원활하게 하는 것이었다. 그 외에 식물재배를 촉진시키는 탄산가스(CO₂)를 공급하기 위한 비연소형 탄산가스 공급장치(특1996-0006750)”, 시설원예재배용 초고농도 탄산가스 발생재료의 제조방법(특2002-0083691), 탄화 가스 연소장치와 그 연소방법(특10-2004-0083230, 일본특허), 탄산가스 공급장치(20-2008-0004664) 등이 있다.

제 3 절 국내외 제품화 현황

1. 국내 제품생산 및 시장 현황

우리나라의 온실자동화나 설비업체는 대부분 시공업체이며 관련기자재를 직접 생산하는 기술을 갖춘 회사는 그다지 많지 않고 산업의 규모도 예측하기 어렵다. 온실관련 설비 중에 난방기나 유비쿼터스 시스템에 대한 국내 업체는 다음과 같다.

각종 온실내 설치기계의 제어시스템이나 복합환경제어기를 생산하는 (주)우성하이텍 (www.wandw.net), (주)세운 (www.sewoon21c.com), 폐쇄형 식물공장을 생산하는 (주)파루 (www.paru.co.kr), 온실내 성장이나 환경을 관측하는 계측시스템을 공급하는 한스시스템 (www.hanssystem.co.kr), 동일계기(주) (www.instrument.co.kr), 관수제품과 자동화설비를 공급하는 한국네타핌 (www.netafim.co.kr), 보온커튼 시스템을 제작하는 (주)탑이엔지 (www.yestopeng.com), 대농이엔지 (www.dneng.co.kr), 일신기업 (www.ishouse.co.kr) 등이 있다.

LPG를 이용한 난방 및 이산화탄소 공급 장치의 경우 LPG를 이용하여 이산화탄소를 공급하는 제품으로 동호기전 (www.dh8744.com)에서 2006년 탄산가스 발생기를 생산했으나 시설내의 산소 부족현상 및 가스 누출 우려에 의해서 농가에서 널리 이용되지는 못하고 있다. 등유를 이용한 이산화탄소 공급 및 보조난방기 제품은 동성기계 (www.ds-mc.net)에서 개발되었고 현재 LPG 방식보다 널리 이용되고 있다.

온실용 열교환기 및 히트펌프의 경우 히트펌프의 경우 2009년 현재 77개 이상의 업체에서 관련 사업을 운영하고 있으며 농업을 대상으로 하는 업체로는 17개 업체 (한국신재생에너지, 삼영종합기기, 코텍엔지니어링, 에프티이앤이 등)에서 지열 또는 공기열을 이용한 히트 펌프 등을 농업 시설 난방용으로 설치하고 있다.

온실의 환경·에너지 관리 기술 시장의 경우 환경 제어의 경우 온실의 자동 제어 차광막 및 측/천창 개폐 자동 제어 부품 및 설비 업체((유)코리아농업개발, 청오엔지니어링, 대림농자재), 온·습도조절, 안개조절 부품을 제품, 설비하는 업체(신영전자, www.shin0.co.kr), 인터넷을 이용한 원격 관리, 제어 설비 업체(희성테크, www.hstec.co.kr) 등 다수의 업체들이 환경 조절 및 관리와 관련된 사업을 운영 중인 것으로 파악된다. 하지만 아직 온실 에너지 저장 및 생산과 관련된 기술은 국내에는 도입된 사례가 드물어 이에 관련된 제어, 관리 시장도 아직 생성되지 못했다.

한편 LPG를 이용한 난방 및 이산화탄소 공급기는 아직까지 국내에서 개발된 사례가 없으며 수입제품의 경우에도 축열 시스템을 갖추어 에너지를 절감하는 예는 없다.

2. 국외 제품생산 및 시장 현황

LPG를 이용한 난방 및 이산화탄소 공급 장치의 경우 유럽에서는 LPG를 이용한 여러 종류의 온실 난방기 제품 시장이 형성되어 있는데 Proheater, Bio-Green, Sahara, Shilton, Regal (www.gardenlines.co.uk, www.greenhousepeople.co.uk, www.greenhousewarehouse.com) 등의 업체가 있고 1.5 ~ 6.0 kW 등의 용량의 제품으로 CO₂ 공급이 동시에 가능하다.

온실용 열교환기 및 히트펌프의 경우 세계적으로 히트펌프를 사업 대상으로 하는 업체는 2300여 업체가 존재 (www.kompas.com) 하는 것으로 조사되는 만큼 히트펌프의 제품화 및 상품화는 이미 실현되어 있다. 하지만 온실을 전문으로 하는 업체는 많지 않은 만큼 온실에 특화된 열교환기 및 히트펌프 시장은 여전히 발전 가능성이 있다. 또한 본 연구에서 통합하려는 열교환기 및 히트펌프의 경우 기존의 지열, 외부 공기열을 이용하는 것과는 다르게 내부, 혹은 연소열을 흡수하는 것으로 시설내의 환경·에너지 통합 기술과 별개로 존재하기 어려운 기술로써 단일 제품 판매 시장 보다는 온실 관리 통합형 제품 시장이 형성될 가능성이 높다.

온실의 환경·에너지 관리 기술의 경우 온실의 환경 관리를 위한 장치를 설비, 컨설팅 하는 업체들 중 다중요소 제어(온도, 습도, 광도, 이산화탄소, 냉·난방, 환기, 시비 등) 설비를 제공하는 업체들로 미국의 Argus Controls, Solar Innovations, Gavish, Forever Flowering와 뉴질랜드의 Autogrow Systems, 호주의 Nursery & Garden Industry 등 많은 업체들이 존재하며 Hardware뿐 아니라 Software를 동시에 공급하고 있는 것으로 분석된다. 하지만 아직까지 온실의 잉여 에너지 활용 기술을 접목하여 온실의 에너지 효율을 높이는 통합 기술은 선진국에서도 찾아보기 힘들다.

제 4 절 연구 결과가 국내외 기술개발에서 차지하는 위치

본 연구는 시설 원예의 환경 제어 기술을 개선하면서 에너지 절감을 수행하려는 것으로서 환경 제어 요소로 온도, 습도, 광, 이산화탄소가 있다. 1960 ~ 1980년대에는 각 요소들이 식물 생육에 어떠한 영향을 주는가, 어떤 조건에서 식물 생육의 개선이 있는가를 연구하였고, 원하는 환경 요소들을 제어하기 위한 제어 장치 및 도구에 대한 연구들이 수행되었다. 냉방 및 난방 분야에서는 온실 피복, 보온 및 차광 스크린, 난방 방법, 난방을 위한 열원, 환기 등의 연구들이 진행되었고(Okada and Takakura, 1973; Bailey, 1981), 광 분야에서는 피복재 및 온실의 구조, 방향에 따른 광투과율, 보광의 종류 및 제어 방법 등이 연구되었다(Bowman, 1970; Cathey and Campbell, 1980; Tsujita et al., 1980; Nijskens et al., 1984; Nijskens et al., 1985; Critten, 1985; Ceulemans, 1986; Critten, 1987a; Critten, 1987b; 박우식과 김문기, 1998). 이산화탄소 분야에서는 CO₂발생기, CO₂ 발생 원료, 방법 등에 대한 연구들이 진행되었다(McKeag, 1965; Heij et al., 1984; Black, 1986; Bravdo, 1986; Lugt et al., 1996, 김영중 등, 1999). 개별 환경 제어 기술에 대한 연구는 최근에도 꾸준히 수행되고 있다. 특히 국내 연구의 경우 국외에서 1980년대까지 수행한 연구들을 1990년대부터 따라잡기 시작하였고, 이 이후 국내외 기술 개발 분야는 크게 차이가 발생하지 않았다.

이와 같은 연구가 있는 후 1980 ~ 2000년대에는 환경 변화에 대한 모델링과 예측, 이를 바탕으로 한 정확한 제어 기술에 대한 연구가 수행되었다(Bot, 1983; Critten, 1983; Chalabi, 1992; Fernandez and Bailey, 1992; 진제용 등, 1993; Cunha et al., 1997; Geoola et al., 1998; Linker et al., 1998; 고희균 등, 1998; 구건효 등, 1998; 임준택 등, 1998; Sharma et al., 1999; 공성훈 등, 1999; Arvanitis et al., 2000; Trigui et al., 2001a; Trigui et al., 2001b; Chalabi et al., 2002a; Chalabi et al., 2002b; Pasgianos et al., 2003; Castaneda-Miranda et al., 2006; Shukla et al., 2006). 2000년 이후부터 현재(2012년)까지는 온실의 에너지 절감, 경제성 향상에 관심을 갖고 에너지 효율 향상을 위한 연구, 폐열 및 잉여열 활용 연구 뿐 아니라 신재생에너지를 온실에 활용하려는 다양한 연구들이 수행되고 있다(김영중 등, 2000; 김영중 등, 2003; Chou et al., 2004; Chinese et al., 2005; 박용정과 김경훈, 2006; Lovichit et al., 2007; 박용정, 2007; Iga et al., 2008; Benli and Durmus, 2009; Cabrera et al., 2009; 강금춘 등, 2009; 서원명 등, 2009; Abdel-Ghany and Al-Helal, 2011).

본 연구는 에너지 절감 및 신재생에너지 활용에 대한 기술 개발 내용으로 에너지의 열원을 폐열, 잉여열, 온실 내부 열에너지 등으로 하여 온실의 에너지 절감 목표를 달성함과 동시에 복합 환경 제어를 통합 시스템으로 구현하려는 것으로써 지금까지 온실의 환경 제어 및 에너지 절감 기술을 통합하는 연구적 위치를 갖는다.

향후 본 연구의 결과는 첨단 농업 기술에 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 이미 연구가 시작된 식물공장, 도시농업, 빌딩농업의 최대 걸림돌은 에너지 사용량이라고 할 수 있다. 고도의 환경제어를 수행하는 과정에서 다량의 에너지가 소모되게 되고, 결과적으로 현재까지 이와 같

은 첨단 농업기술에 대한 경제성은 확보하지 못한 상태이다. 본 연구는 고도의 복합 환경 제어를 수행하면서도 신재생에너지를 활용한 에너지 절감 기술을 개발한 것으로써 향후 첨단 농업 기술로의 활용성이 크다고 하겠다.

지금까지 설명한 본 연구 결과의 국내·외에서 차지하는 위치를 도식으로 표현하면 그림 7과 같다.

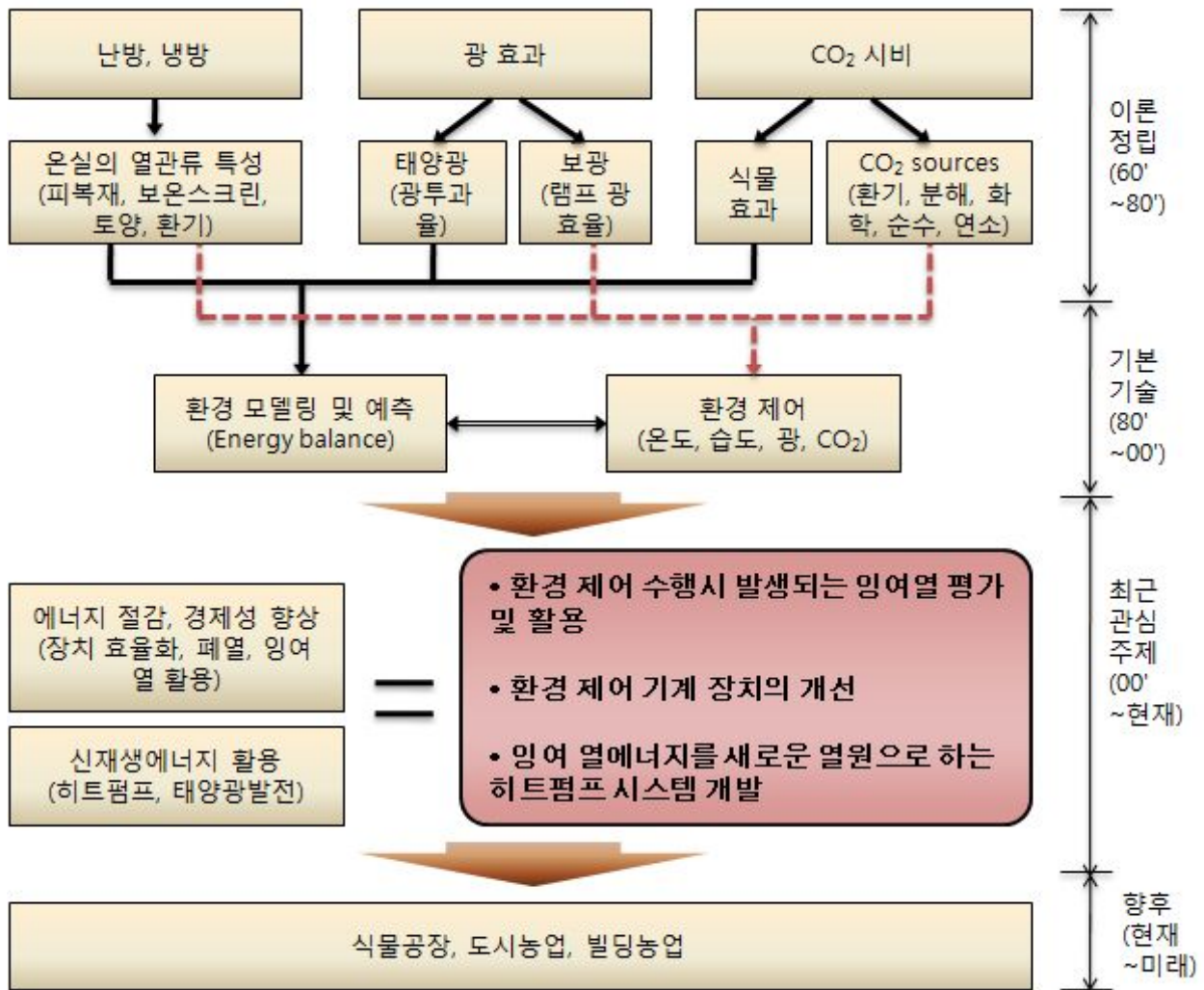


그림 7. 연구 결과의 국내·외에서 차지하는 위치

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 기초 개념 설계

1. 관행온실의 에너지 사용수준 파악

온도 계측값을 기록하고 있는 온실 중에서 전주 지역과 부산 지역의 온실을 한군데 씩 선정하여 온실의 열부하 계산을 시도하여 과거의 기존 연구 값과의 비교를 수행하여 관행 온실의 에너지 수준을 파악하여 보았다. 그 결과는 표 2와 같다. 기존 온실의 열부하 계산에 이용되던 디그리 아워(Degree hour)를 실제 최근에 측정된 데이터를 이용하여 산출한 결과 일반적인 모델을 이용한 결과와 기존의 연구 결과에 비하여 약간 높은 값을 보였다. 이와 같은 현상의 원인을 분석해 본 결과 기존의 방식의 경우 지역별 기상청 데이터를 기준으로 디그리 아워를 산출한다는 것에 기인한 것으로, 실제 지역별 온실의 기상 데이터는 기상청 데이터와 상당한 차이를 보였다. 따라서 본 연구에서는 기상청 값이 아닌 온실 자체적인 기상 자료를 수집하여 온실의 냉·난방 제어 로직에 활용하는 것이 필요하다는 결론을 얻었다.

표 2. DH 모델을 이용한 온실의 열부하 계산과 기존 연구과의 비교

지역	월 (2008년도)	직접 산출값	Mihara의 DH 모델 이용 값					DH	기존연구 (1998) 산출값
			T_m (°C)	T_l (°C)	T_h (°C)	T_c (°C)	s(hr)		
전주	1월	432.9	-0.2	-5.9	7.9	18.8	5.1	379.8	352
	2월	355.7	5.0	-1.0	12.1	18.8	3.9	291.2	323
	4월	194.2	13.6	6.0	22.9	18.8	7.4	117.3	142
부산	1월	340.0	-0.3	-5.5	7.3	13.3	6.3	264.7	333
	2월	282.3	5.5	-0.5	14.4	18.1	5.4	258.4	306
	4월	119.8	11.1	2.2	22.5	19.2	7.8	169.4	134

2. 겨울철 장미 온실의 지역별 에너지 사용 패턴 조사

난방비용이 높은 작물인 장미를 대상으로 중남부 지방인 전주 지역과 남부 지방인 부산 지역의 한 농가를 선택하여 실제 온실의 온도 및 일사량 데이터를 획득하였다. 맑은날 전주지역 (그림 8)의 최고, 최저 외기 온도와 최대 일사량은 4.9°C, -14.1°C, 608 W/m² 인 반면 부산지역 (그림 9)의 경우 각각 11.5°C, -6.7°C, 639 W/m² 였다. 따라서 온실 국지 기상 상태에 큰 차이가 있다는 것이 확연히 드러났다. 또한 전주지역 온실 내 온도는 16.0 - 25.9°C에서 유지되고

있었고 부산지역의 경우 6.9 - 32.9°C로 유지되고 있는 것으로 계측되어 동일 작물의 경우에도 각각 다른 온도 관리를 하고 있었음이 확인되었다. 또한 기존 온실에서는 에너지 평가에 필요한 물, 전기, 연료 사용량 등을 기록하고 있지 않은 것으로 조사되어 에너지 평가를 위해서는 추가적인 온실 운영 요소들의 계측이 필요한 것으로 분석되었다.

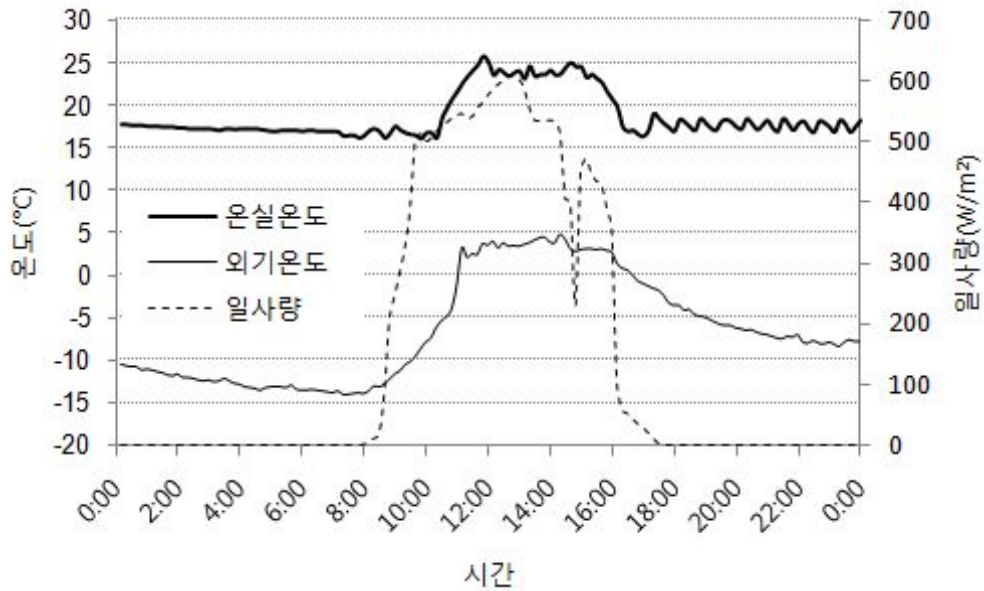


그림 8. 전주지역 장미 온실 (2009년 1월 15일)

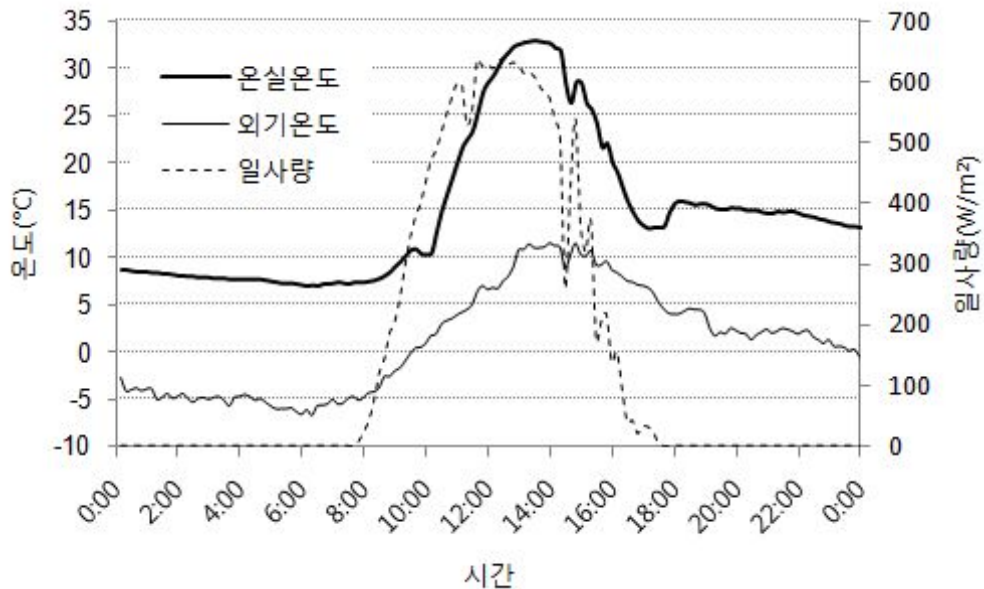


그림 9. 부산지역 장미 온실 (2009년 1월 18일)

3. 온실용 하이브리드 히트펌프 시스템 개념 설계

가. 온실용 하이브리드 히트펌프 시스템의 작동 흐름

본 연구에서 개발한 하이브리드 히트펌프의 열에너지 흡수/배출 흐름은 다음 그림 10과 같다. 열에너지는 크게 3가지에서 흡수되는데, 주간(겨울)의 잉여 열에너지와 공기열, 지하수열이 흡수할 에너지에 포함된다. 기본적인 히트펌프의 역할은 저온 축열조 또는 공기열로부터 열에너지를 고온탱크로 옮겨주는 것이다. 주간(겨울)의 잉여 열에너지는 온실 상단의 열교환장치로부터 저온탱크의 온도를 유지하는데 활용되고, 동시에 온실에 냉각효과를 주어 천창 및 환기팬의 작동을 필요 없게 해준다. 또한 본 연구에서는 이산화탄소 공급 장치를 개발하여 이용할 예정으로 환기 및 천창 개방을 하지 않게 될 경우 온실 내 이산화탄소 손실 방지 효과가 있기 때문에 에너지 효율과 작물 생산 효율을 동시에 높일 수 있다.

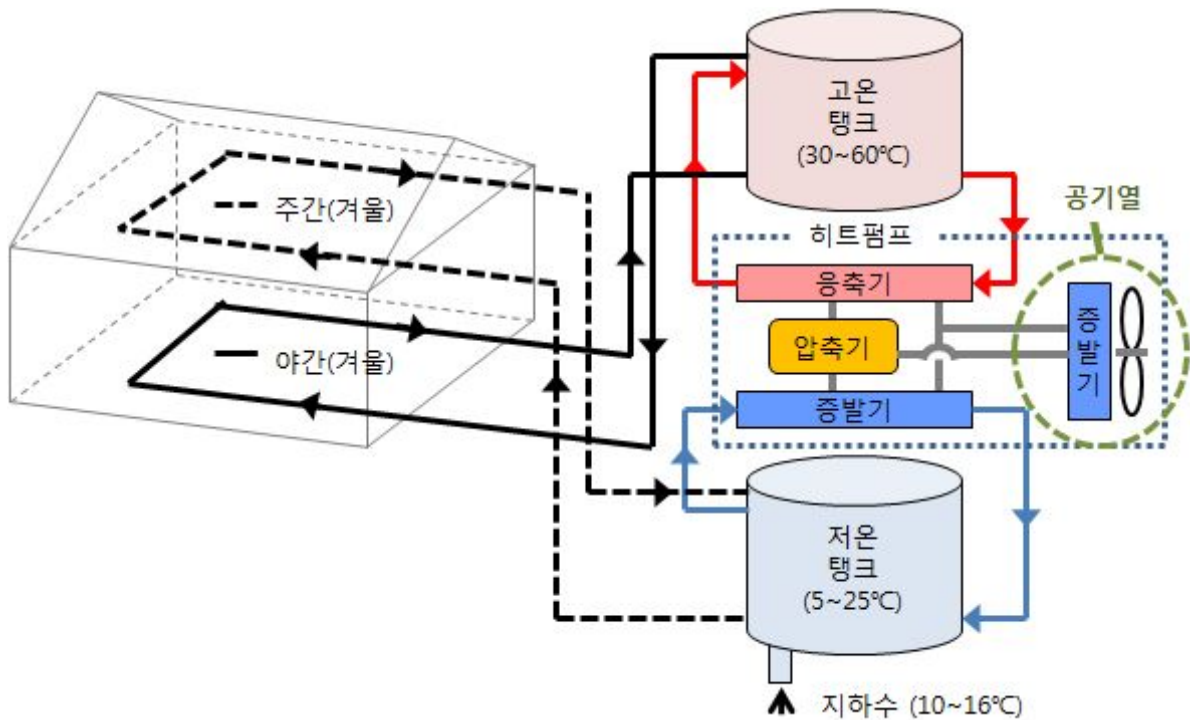


그림 10. 개발된 하이브리드 히트펌프의 열에너지 흡수/배출 흐름도

나. 하이브리드 히트펌프(프로토타입)와 축열 탱크의 용량 선정

하이브리드 히트펌프의 열유체는 지하수(물)가 사용된다. 물을 이용할 경우 열회수 목적의 저온 축열조의 온도는 7 - 15°C가 적합한데 그 이유는 효율적인 열회수와 히트펌프의 안정적인

운영을 동시에 만족시킬 수 있는 온도 범위이기 때문이다. 이 온도 범위보다 더 낮게 되면 히트펌프의 증발기 내에서 물이 얼 가능성이 있고, 온도가 더 높게 되면 온실 내 잉여 공기열과의 온도차가 적어져서 열회수가 안될 가능성이 있다. 고온 축열조의 온도 범위는 35 - 50℃가 적합한데 그 이유는 35℃ 이하에서는 온실 난방시 충분한 열량을 공급하지 못하게 되고, 50℃ 이상에서는 히트펌프의 성능(COP)이 크게 떨어진다.

축열조의 크기는 실험 온실의 난방부하와 잉여 공기열 에너지의 양으로 결정된다. 2중 유리를 피복재료한 실험 온실의 경우 전열전달계수가 3.0 W/m²·℃ 수준인 것으로 발표되어있다 (ASAE, 1988). 보온 스크린이 처진 경우 전열전달계수는 1.0 W/m²·℃ 수준까지 떨어진다. 일사량으로부터 온실 내 공기열 에너지량을 예측하기 위해서 온실의 바닥면이 온실로 입사되는 태양 복사에너지의 영향을 받는 면적이라고 가정하였다. 또한 피복재의 투과율과 식물의 보웬 비(bowen ratio)(Campbell, 1977)를 고려할 때 약 50% 정도의 태양 복사에너지가 공기 열에너지로 전환 된다고 볼 수 있다. 이와 같은 관계를 식으로 나타내면 야간에 난방이 수행되는 경우는 식 (1)과 같이 표현되고, 주간에 잉여 공기열이 발생하는 경우 식 (2)와 같이 표현 된다.

$$H_{loss} = U_{gh} \times A_{gh} \times (t_{ctr} - t_{min}) \times T_{hd} \quad (1)$$

$$H_{sp} = \tau_{gh} \times A_{flr} \times I_{s,day} - U_{gh} \times A_{gh} \times (t_{ctr} - t_{max}) \times T_{sd} \quad (2)$$

위 식에서 H_{loss}와 H_{sp}는 열손실량, 열잉여량을 나타내고, U_{gh}는 온실의 전열전달계수, A_{gh}와 A_{flr}는 각각 온실의 피복면적과 온실의 바닥면적을 나타낸다. τ_{gh}는 태양 복사에너지의 공기열 에너지 전환 비율, I_{s,day}는 일일 일사량 누적량이고 t_{ctr}, t_{min}, t_{max}는 제어 온도, 최저 온도, 최대 온도이다. T_{hd}와 T_{sd}는 난방 시간과 잉여열 발생 시간을 나타낸다. 따라서 실험 온실의 조건(피복면적: 267.3 m², 바닥면적: 99.4 m², 최저온도: 15℃, 최고온도: 25℃)에 따라 계수를 대입하면 다음 식 (3)과 식 (4)와 같이 된다.

$$H_{loss} = 1.0 \times 267.3 \times (15 - t_{min}) \times T_{hd} \quad (3)$$

$$H_{sp} = 0.5 \times 99.4 \times I_{s,day} - 3.0 \times 267.3 \times (25 - t_{max}) \times T_{sd} \quad (4)$$

기상청의 기상월보(기상청, 각년도)를 참고하여 실험 온실 근처인 수원 지역의 과거 기상 조건들을 분석해 보면 표 3과 같은 결과를 확인할 수 있다. 이 자료에 따르면 수원 지역의 겨울철 월 최고 일조시간은 9 ~ 10시간이고 일일 최대 일사량 누적량은 10 ~ 16 MJ/m² 이다. 이 자료와 상기에 제시한 식들을 이용하여 난방부하와 잉여 공기열 에너지량을 예측해보면 다음 그림 11, 12과 같다. 따라서 난방을 위해 축열해야할 열량은 최대 340 MJ/day이고 히트펌프 시스템의 고온 축열조의 운영 온도 범위(25 ~ 50℃) 내에서 고려해 보면 필요한 축열조의 크기

는 5.4 m³가 계산된다. 또한 잉여 공기열 에너지 발생량은 최대 400 MJ/day로 저온 축열조의 운영 온도 범위(7 ~ 15°C)를 고려하면 11.9 m³가 산출된다. 따라서 고온 축열조는 5톤 물탱크 1대를, 저온 축열조는 5톤 물탱크 2대를 설치하는 것이 적합한 것으로 설계된다. 선정된 물탱크는 그림 13에서 보는 것과 같다.

표 3. 수원 기상대에서 측정된 과거 겨울철 기상 조건

	온도 (°C)			일조시간* (hour)	일일 일사량* (MJ/m ²)
	평균	최대	최소		
2007년 12월	1.6	14.3	-6.5	9.2	10.4
2008년 1월	-1.6	7.9	-12.1	9.5	12.4
2008년 2월	-1.6	11.8	-10.4	10.4	16.8
2008년 12월	0.9	14.5	-12.0	9.2	10.5
2009년 1월	-2.6	12.5	-14.6	9.4	12.3
2009년 2월	2.4	17.0	-9.1	10.1	16.0

* 최대값

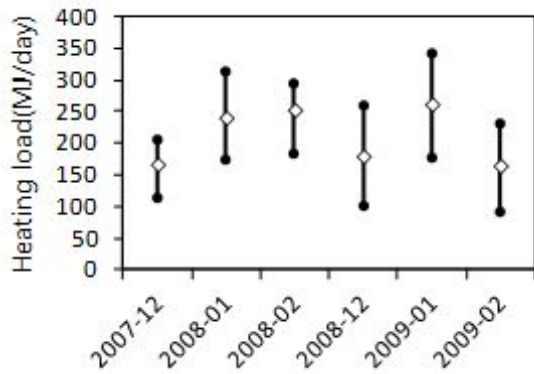


그림 11. 산출된 요구 난방

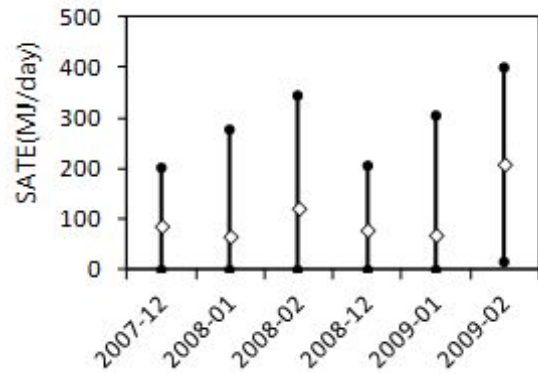


그림 12. 산출된 잉여 공기열 발생 열량



그림 13. 선정된 축열조(FRP, 50톤)와 위치 선정

산출된 난방 요구 열량과 잉여 공기열 에너지량을 기준으로 히트펌프 용량을 설계하면 6.5 kW 급 콤프레셔와 35 kW 급 증발기, 27 kW 급 응축기를 장착하면 적합한 것으로 설계된다. 설계된 히트펌프는 시간당 58.5 MJ의 저온 축열조 열량을 흡수하여 81.9 MJ 열량으로 고온 축열조에 공급할 수 있다. 이 때 COP는 3.5 수준으로 예상된다. 프로토타입으로 제작 중인 히트펌프의 사진은 다음 그림 14에서 보는 것과 같다.

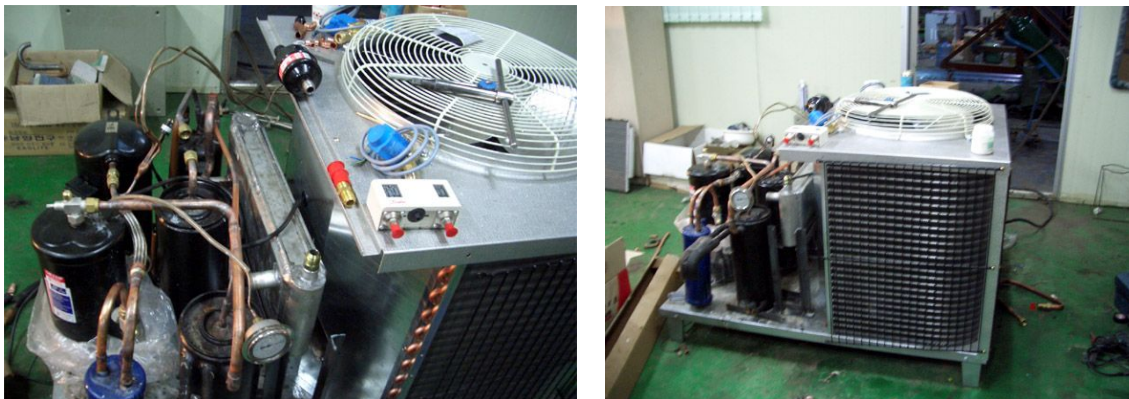


그림 14. 온실용 하이브리드 히트펌프(프로토타입)의 제작 과정

다. 온실용 하이브리드 히트펌프의 성능평가 계획

하이브리드 히트펌프 시스템의 성능평가는 크게 3개의 단계로 수행하려고 계획되었다. 1단계는 저온탱크에서 고온탱크로 실제로 전달되는 열량을 측정하여 실제 시스템 내의 성능을 측정하는 것이다. 2단계는 고온탱크에서 온실로 전달되는 열량으로 실질적인 온실공급 에너지는 2단계의 결과에서 확인될 수 있다. 추가로 3단계는 주간 온실의 잉여열 흡수 성능으로 저온탱크로 흡수되는 열량을 측정할 수 있다. 다음의 그림 15는 온실용 하이브리드 히트펌프의 성능 평가를 위한 데이터 측정 포인트를 나타낸다.

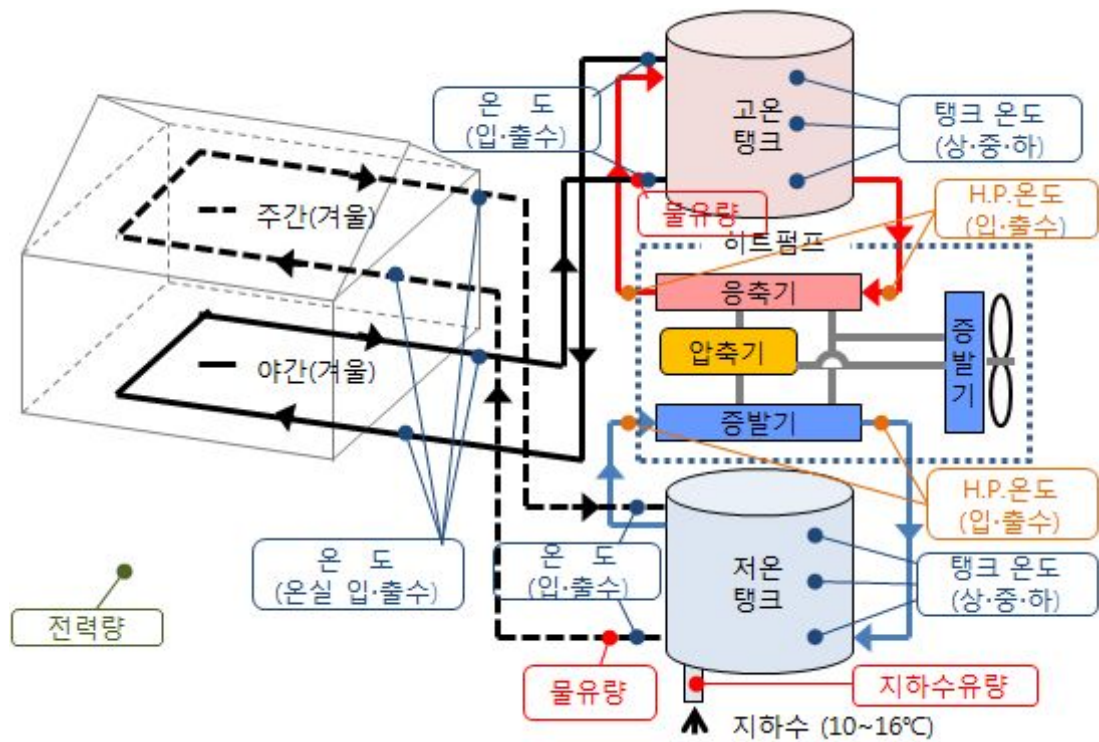


그림 15. 온실용 하이브리드 히트펌프의 성능 평가를 위한 데이터 측정 포인트

4. 연소열 회수식 CO₂ 발생기의 개념 설계

가. 기존 연소형 CO₂ 발생기의 문제점 분석

연소형 CO₂ 발생기를 이용할 경우 발생할 수 있는 CO, NO_x, SO_x 등의 가스들은 작물에 피해를 줄 수 있다. CO는 CO₂ 발생기의 작동 전후의 불완전 연소에 의하여 발생하는 것으로 ON/OFF 제어 방식의 경우 컨트롤하기가 어려운 점이 있고, NO_x는 탄화수소계열 연료의 모든 연소에서 필연적으로 발생하는 유해가스로 온실의 산성화를 시켜서 어린 잎 등에 피해를 준다. SO_x는 일반적으로 등유, 경유 등의 액화 연료의 경우 발생하는 유해가스로 작은 농도에도 작물이 해를 입는다. 최근 높은 정제기술로 인하여 과거에 비해 그 위험성은 줄어든 편이지만 유해가스가 온실로 유입되는 것을 방지하는 기술은 필수적으로 마련되어야 한다. 다음의 표 4는 식물에게 해가 되는 유해가스 성분과 증상을 정리한 것이다.

표 4 식물에게 해가 되는 유해가스 성분과 증상

유해가스	증상	역치값
CO (carbon monoxid)	식물에게 보고된 증상은 없지만 사람에게는 매우 유해함	50 ppm
C ₂ H ₄ (ethylene)	꽃받침 건조, 끝눈 우성, 절간의 단축, 잎의 상 위생장, 조기 성숙, 잎과 꽃의 절단	0.25 - 0.5 ppm
C ₃ H ₆ (propylene)	상위생장 (잎꼭지의 하향 만곡증)	10 - 50 ppm
SO ₂ (sulfur dioxide)	상아색의 피사	0.3 - 0.5 ppm
NO _x (nitrous oxides)	광합성 감소(CO ₂ 공급 효과 감소), 잎그슬림	0.25 ppm
PAN (peroxyacetyl nitrate)	잎의 갈화 및 투명화 (세포 파괴)	0.02 - 0.1 ppm

(Hanan(1998)의 자료를 재구성함. PAN의 경우 Hopkins and Hüner(2004)에서 발취)

연소식 이산화탄소 발생기의 경우 탄화수소 계열의 산화반응으로 인한 발열 반응을 동반하기 때문에 필연적으로 열을 동시에 공급하게 되어 온실의 온도 상승 문제가 발생한다. 이와 같은 문제로 인하여 기존의 CO₂ 발생기의 경우 사용할 수 있는 시기 및 시간이 매우 단기간이다. 즉, 저온기에 일시적으로만 활용이 가능하다. 따라서 본 연구에서 개발할 연소식 CO₂ 발생기의 경우 연소열의 회수 할 수 있는 장치를 추가하고 하이브리드 히트펌프 시스템과 통합되게 된다.

또한, 연소는 산소(O₂)를 탄화수소연료(C_xH_y)와 반응시키는 것으로 온실 내 공기를 이용하는 CO₂ 발생기의 경우 작동할수록 온실 내의 산소 농도가 줄어든다. 이와 같은 현상을 산소 결핍(oxygen deficiency)이라고 하고 이 때 공기 중의 산소 결핍은 토양의 산소 결핍으로 이어져 식물의 단백질 합성을 저해하게 된다(Taiz and Zeiger, 1991). 따라서 연소식 이산화탄소 발생기의 연소 공기는 반드시 외부에서 이용하는 것으로 설계 되어야 한다.

나. 기존 연소형 CO₂ 발생기의 문제점 해결 방안

기존의 CO₂ 발생기의 문제점들을 해결하기 위해서 본 연구는 다음의 방법을 구상하였다. 먼저 연소조건 제어를 통하여 CO 및 NO_x 발생 최소화할 수 있도록 하고, 열교환기 구조 및 작동 제어를 통한 연소가스 온도 제어를 통하여 온실로 고온의 이산화탄소 공기가 공급되지 않도록 한다. 또한 외부 공기 흡입을 통한 연소 시스템을 구현하고 마지막으로 연소 공기를 외부

공기로 희석하여 온실용 CO₂ 혼합 공기를 만들어 흡수 있을 수 있는 유해가스를 최대한 희석하고 온실로 공급한다.

다. LPG CO₂ 발생기의 온실 통합 성능 평가 계획

LPG CO₂ 발생기의 요구되는 성능은 발생된 CO₂ 혼합 공기의 작물 생산의 적합성과 연소열 회수 효율에 중점을 두어서 평가한다. CO₂ 혼합 공기는 기본적으로 휴대용 측정기를 이용하여 CO, NO_x의 함유량을 측정하고, 더 정밀한 가스의 성분은 가스 분석 기관에 의뢰하여 작물 적합성을 평가한다. 또한 CO₂ 혼합 공기의 온도는 온실의 온도 제어와 관련된 요소로써 온실의 목표 온도 10% 내외에서 유지하도록 한다. 연소열 회수 효율은 열교환기 전후, 축열 탱크의 배출수, 유입수의 유량 및 온도를 측정하여 열량 계산을 수행한다. 본 연구에서 계획한 CO₂ 발생기의 데이터 획득 포인트는 다음 그림 16과 같다.

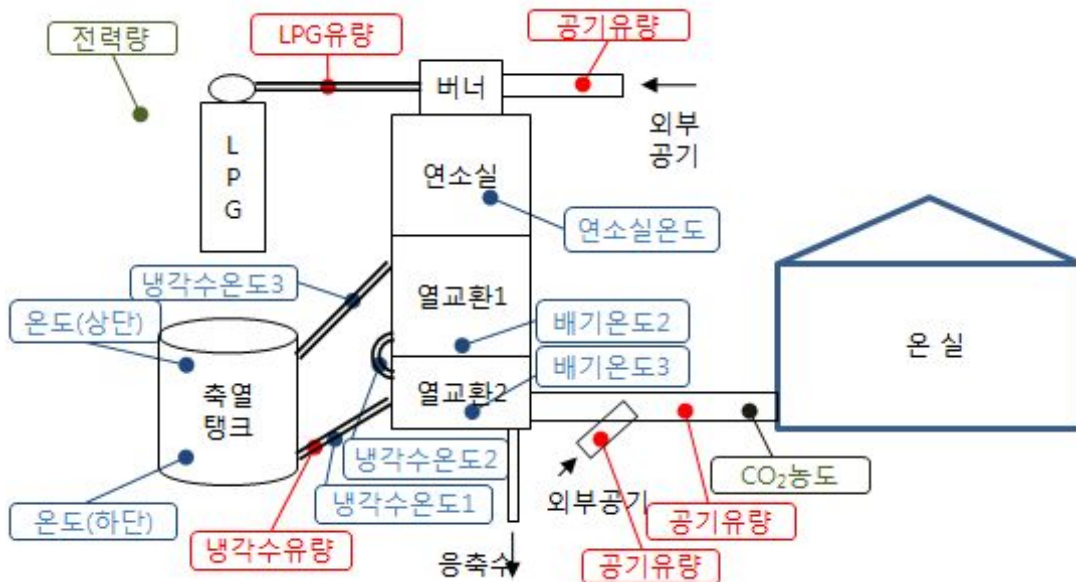


그림 16. CO₂ 발생기의 성능평가 데이터 획득 포인트

5. 유비쿼터스 온실통합제어 시스템의 개념 설계

온실의 환경과 에너지를 통합하여 관리할 수 있는 시스템이 본 연구과제의 목표 중 하나이기 때문에 다음 그림 17과 같은 유비쿼터스 온실통합관리시스템을 설계하였다. 메인컨트롤러는 크게 3가지 기능을 포함해야 하는데 첫 번째가 온실 내 주요 환경 및 작동 요소들을 계측하는 것이고 두 번째가 CO₂ 발생기, 히트펌프, 서버컴퓨터와 같은 개별 장치들과의 통신 및 제어 명령 전달이고 세 번째가 환경 및 에너지 관리를 위해서 작동시켜야 하는 FCU, 순환펌프, 보광 등의 단위 기계들을 직접 제어하는 것이다. 이 때 서버컴퓨터는 인터넷과 연결되어 있어서 외

부의 컴퓨터 또는 핸드폰, 스마트 폰과 계측값 및 제어 설정값 입출력이 가능하게 된다.

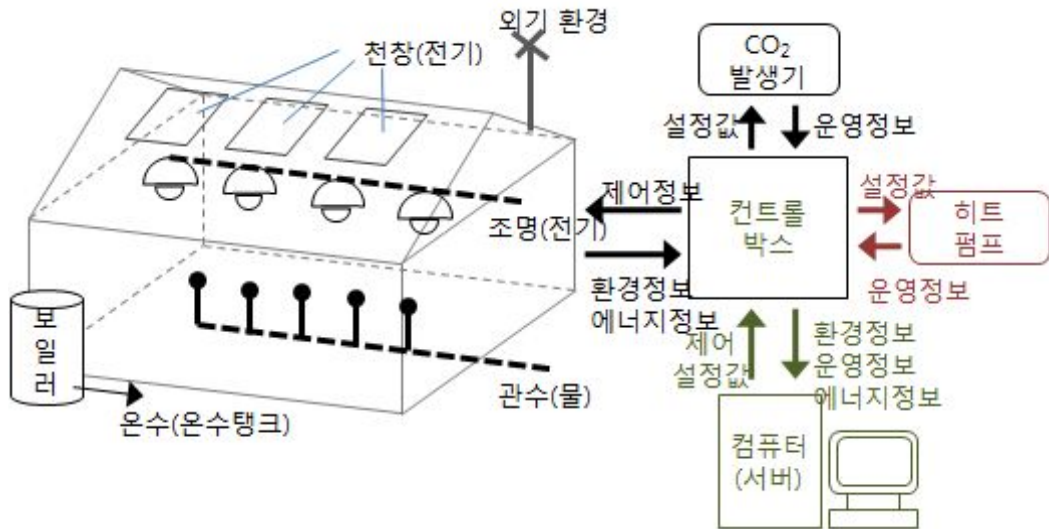


그림 17. 유비쿼터스 온실통합관리시스템의 개념 설계

히트펌프와 탄산가스 발생기, 보광 등을 제어는 마이크로컨트롤러를 이용한 에너지 제어 장치를 개발하여 수행을 하게 되고 제어에 필요한 설정값 및 명령은 에너지 관리 프로그램을 개발하여 수행한다. 프로그램의 안정성과 데이터 손실의 방지를 위하여 에너지 관리 프로그램과 에너지 장비 제어기는 데이터베이스를 이용한 간접 통신을 수행하도록 한다. 따라서 하나의 프로그램 수행에 문제가 발생하여도 연쇄적인 시스템 오류를 방지할 수 있다. 또한 모든 자료를 데이터베이스를 통하여 처리하도록 하여 데이터 손실의 위험성은 줄어들도록 설계하였다. 전체 제어 시스템의 통신의 구조와 서버 컴퓨터 프로그램 구조는 다음 그림 18과 같다.

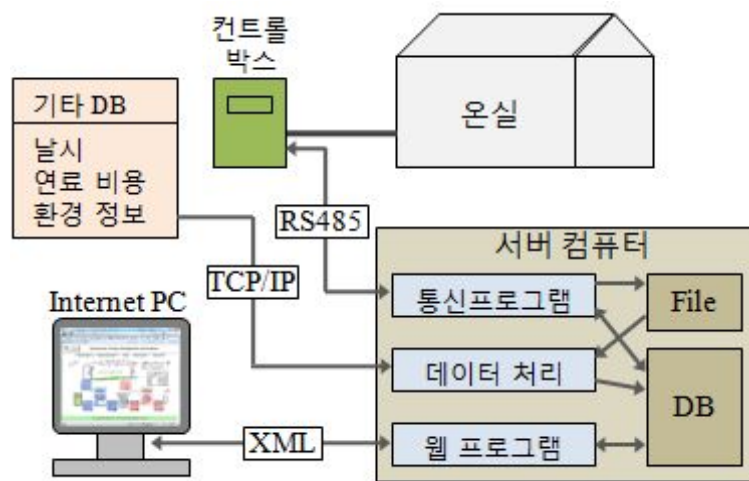


그림 18. 제어 시스템의 통신의 구조와 서버 컴퓨터 프로그램 구조

제 2 절 기초 실험

1. 온실 환경에서 정확한 온·습도 데이터 측정 방법

온실 환경 모니터링 기술의 대상이 되는 환경 정보로는 온도, 습도, 이산화탄소의 농도, 일사량, 풍향, 풍속 등이 있으며 이들이 정확하게 측정되어야 적절한 환경조절이 가능하다. 다양한 환경 정보 중 가장 기본이 되는 데이터는 온도이다. 따라서 온도가 정확히 측정되는 것은 온실 환경 모니터링에서 가장 중요한 부분이라고 할 수 있다. 온도의 측정에 있어 습구 온도는 풍속, 복사, 습구의 크기에 영향을 받으며, 강한 복사가 있는 경우 정확한 공기 온도를 측정하는 것이 어렵다는 것이 기존 연구를 통해 밝혀져 있다. 또한, 풍속과 단파 복사가 온도 측정의 오차를 가져올 수 있음도 알려져 있다. 따라서 온실의 환경 및 에너지를 정확하게 관리하기 위한 기초 기술로써 온실내의 정확한 온·습도 측정 방법에 대한 연구가 수행되었다.

가. 실험 장치

식물 성장용 나트륨등(HC400, 금오전기)을 이용하여 복사열을 발생하였고, 풍량 조절기(MNRO47M B19ME, 명성전기)를 사용하여 풍속을 조절하였다. 복사열의 영향을 확인하기 위하여 한쪽의 USB 데이터로거(GT171, Gilwoo)는 알루미늄 호일로 만든 덮개를 이용하여 복사열을 차단했다. 복사열의 측정은 복사열측정기(Eppley radiometer, The eppley laboratory, INC.)를 이용하였고, 풍속 측정은 풍속 측정기(VT200, KIMO)를 이용하였다. 이 실험은 겨울철(2009년 12월) 실내에서 수행되었기 때문에 실험 장치의 내부 온도의 유지를 위해 아스테이트지를 이용하여 2겹으로 보온하였다. 실험 장치 구성은 다음 그림 19과 같고, 사진은 그림 20과 같다.

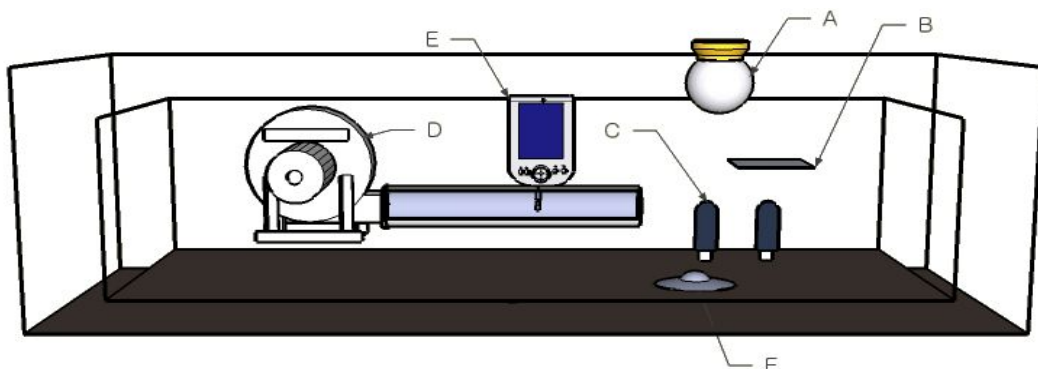


그림 19. 온도 측정 실험 장치의 구조

(A: 나트륨등, B: 알루미늄차단, C: USB 온습도 데이터 로거,
D: 풍량조절 송풍기, E: 풍속계, F: 일사량계)



그림 20. 온도 측정 실험 장치의 사진

나. 실험 결과

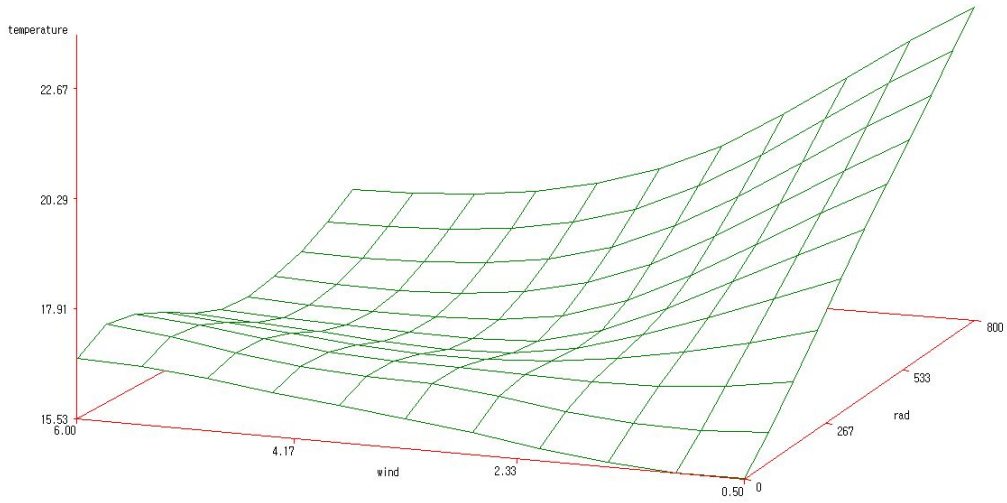
실험은 온실의 온도범위를 저온(15℃), 중온(25℃), 고온(35℃)으로 나누어 각각의 범위에서 복사열과 풍속을 변화시키면서 실험하였다. 복사열은 0 W/m², 60 W/m², 400 W/m², 800 W/m²로 나누어 실험하였고, 풍속은 0.5 m/s, 3.0 m/s, 6.0 m/s의 3가지 조건으로 나누어 실험하였다. 그 결과는 다음 표 5와 같다.

표 5. 복사열과 풍속의 세기에 따른 온도 측정 오차

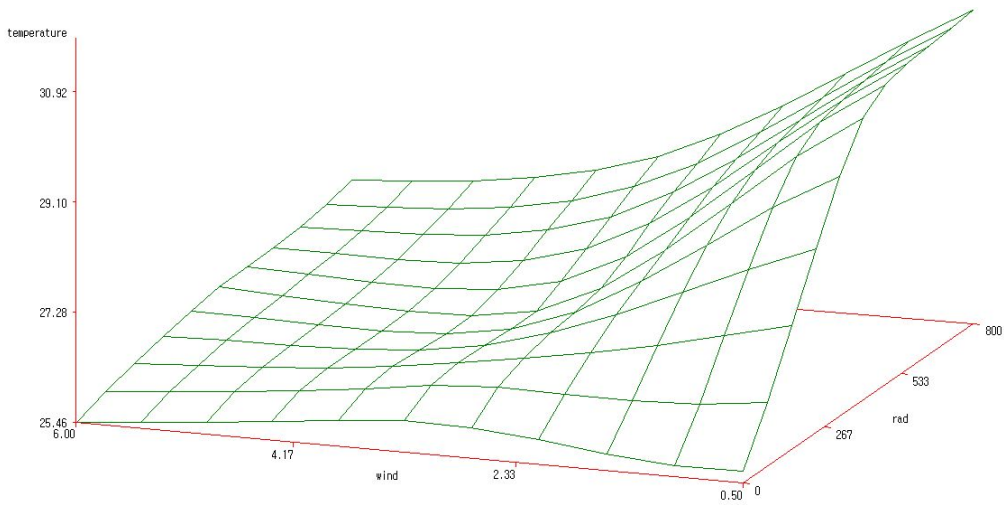
실험 조건			일사량에 영향을 받은 온도센서의 계측값(℃)	일사량을 차단한 온도센서의 계측값(℃)	온도차이(℃)
광량(W)	온도(℃)	풍속(m/s)			
60	15	0.5	16.3	15.9	0.42
60	15	3.0	17.3	17.1	0.14
60	15	6.0	18.0	17.9	0.05
60	25	0.5	26.1	26.0	0.06
60	25	3.0	26.7	26.6	0.06
60	25	6.0	26.5	26.2	0.29
60	35	0.5	35.3	35.0	0.30
60	35	3.0	35.4	35.4	0.04
60	35	6.0	35.3	35.2	0.10
400	15	0.5	19.4	14.0	5.40
400	15	3.0	15.9	14.5	1.42
400	15	6.0	16.3	15.4	0.83

400	25	0.5	30.8	27.8	3.04
400	25	3.0	27.0	25.8	1.18
400	25	6.0	26.4	25.8	0.60
400	35	0.5	38.8	35.7	3.10
400	35	3.0	33.8	32.8	1.01
400	35	6.0	34.2	33.6	0.59
800	15	0.5	22.9	14.3	8.58
800	15	3.0	18.7	15.3	3.41
800	15	6.0	17.8	15.6	2.09
800	25	0.5	32.6	26.1	6.58
800	25	3.0	27.3	25.0	2.27
800	25	6.0	26.7	25.5	1.25
800	35	0.5	43.9	37.7	6.22
800	35	3.0	36.6	34.5	2.10
800	35	6.0	35.8	34.6	1.17
0	15	0.5	16.1	16.0	0.12
0	15	3.0	15.9	15.8	0.15
0	15	6.0	16.2	16.1	0.17
0	25	0.5	26.3	26.4	0.00
0	25	3.0	25.5	25.2	0.27
0	25	6.0	26.2	26.0	0.18
0	35	0.5	35.3	35.2	0.14
0	35	3.0	35.5	35.3	0.19
0	35	6.0	35.4	35.2	0.23

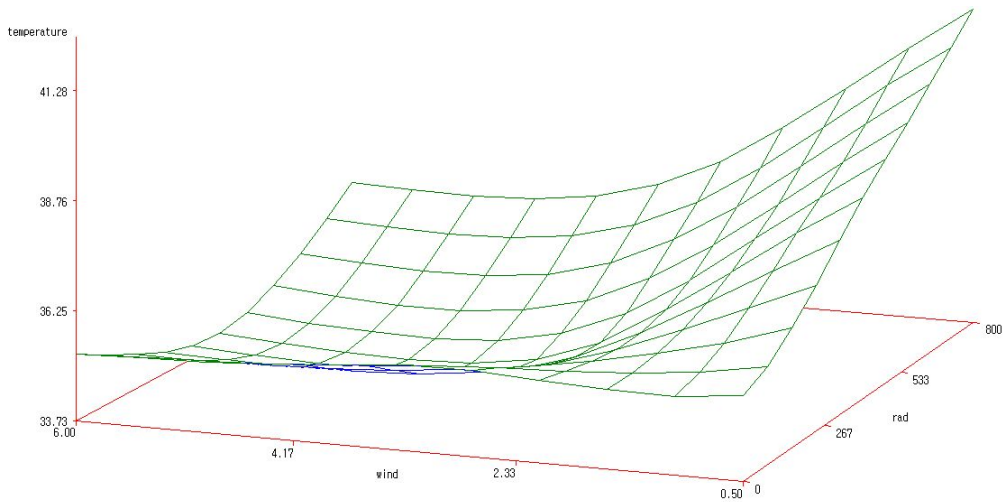
복사열이 없는 상황에서 풍속에 의한 온도의 변화는 특정한 패턴이 없고, 그 변화폭도 0.1 ~ 0.9℃의 범위로 작아 실험 오차를 감안했을 때 풍속에 의한 온도 변화는 없는 것으로 볼 수 있다. 하지만 일사량이 있는 경우 복사열과 풍속에 의한 온도 변화가 동시에 나타난다. 복사열이 높을수록 온도가 높고, 풍속이 빠를수록 온도가 낮다. 이는 복사열이 높더라도 풍속이 빠르다면 복사열에 의한 온도의 증가가 상쇄됨을 의미한다. 이와 같은 변화를 3차원 그래프로 나타내면 다음 그림 21와 같다.



(a) 저온(15°C)에서의 변화



(b) 중온(25°C)에서의 변화



(c) 중온(35°C)에서의 변화

그림 21. 복사열과 풍속의 세기에 따른 측정 온도의 변화

다. 결론

본 실험을 통하여 온실 환경에서 온도를 측정하고자 할 때 유의할 점은 다음과 같이 4가지로 확인되었다.

- ① 복사열은 온도계에 직접적으로 영향을 주어 온도를 변화시키며, 복사열에 의한 온도차는 복사열이 강할수록 증가된다.
- ② 복사열에 의한 온도차는 대기온도가 낮을 때 크게 나타나며, 대기온도가 높으면 특정한 수준으로 수렴하는 경향을 보인다.
- ③ 복사열이 없을 때 풍속에 의한 온도 변화는 발생하지 않는다.
- ④ 복사열에 의한 온도차는 풍속이 낮을 때 심하게 나타나며 풍속이 일정 수준이 되면 상쇄되는 경향을 나타낸다.

2. 강제 통풍식 온실내 온도 측정 장치의 개발

가. 기존의 온실의 온도 측정 방식에 대한 검증 필요성

이미 상당수의 온실은 온도, 습도 등의 기본적인 환경 계측 장비들을 갖추고 있다. 특히 온도의 경우 난방비, 냉방비와 직접 연관되는 중요한 데이터이다. 온실은 태양광에 직접 노출되는 건축물로서 온도 계측부(센서)를 대기 중에 개방하여 측정을 할 경우 태양 복사열에 의하여 상당한 오차가 발생한다. 이미 이와 같은 문제점은 널리 알려져 있기 때문에 다양한 상용 복사열 차단장치가 있고 실제 우리나라 온실에서도 기본적인 복사열 차단장치를 이용하고 있다. 다음의 그림 22은 온실에서 사용되고 있는 복사열 차단 장치들의 예이다.

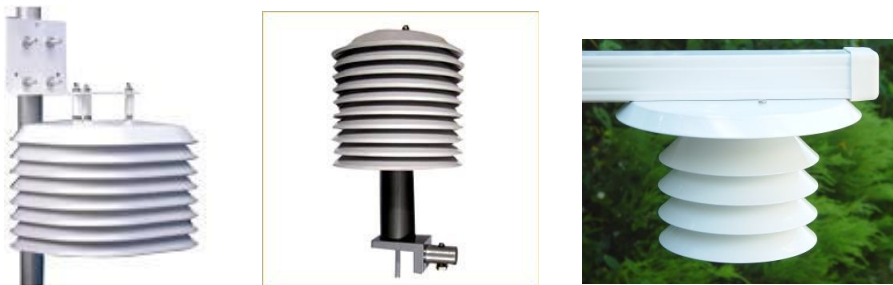


그림 22. 온실에서 활용되고 있는 복사열 차단장치

또한 온실의 난방부하 및 에너지 관련 설계를 수행할 때에는 상용 복사열 차단장치 뿐 아니

라 종이컵과 같은 최소한의 복사열 차단을 시도하여 온·습도 데이터를 측정하기도 한다. 결과적으로 측정 오차는 설비비, 냉·난방비의 낭비를 초래하기 때문에 본 연구에서 수행하려는 에너지를 절감하려는 목표에서는 매우 민감할 수밖에 없다. 따라서 이에 대한 면밀한 검증이 필요하다.

나. 실험 장치

본 연구에서는 아스만통풍건습계로 알려진 강제 통풍식 복사열 차단장치에 착안하여 센서 방식의 온습도계에 적합한 간단하고 새로운 구조를 설계하여 그 효과의 검증을 시도하였다. 대조군으로 상용 복사열 차단장치를 비롯하여 종이컵, 수평형 원통, 수직형 원통, 평판 등의 쉽게 제작이 가능한 간이 복사열 차단장치 등을 선택하여 온도 측정 결과를 비교하였다. 온·습도 측정에는 USB 온습도 데이터 로거(GT171, 길우트레이딩)가 사용되었고(그림 23) 복사열 차단 효과를 비교한 각각의 형태는 다음의 그림 24와 같다. 데이터의 정확한 측정을 위해서 USB 온습도 데이터 로거의 센서부 보호 덮개는 제거하였다.



그림 23. USB 온습도 데이터 로거

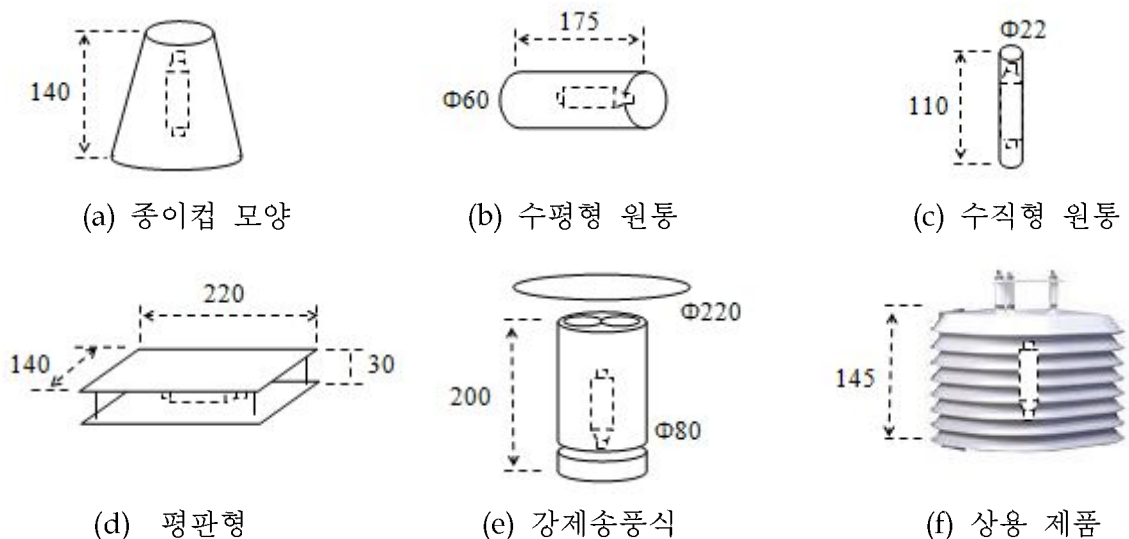


그림 24. 복사열 차단 효과 비교에 쓰인 복사열 차단 형태

간단하게 설계한 강제 송풍식 복사열 차단 장치의 자세한 구조와 공기 흐름은 다음 그림 25와 같다.

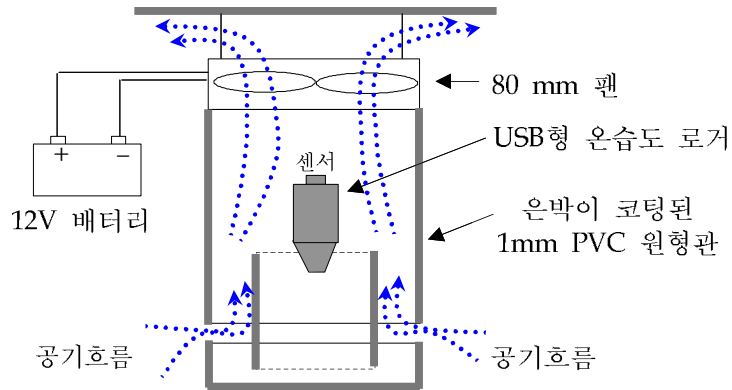


그림 25. 제작된 강제 송풍식 복사열 차단 장치의 구조와 공기 흐름도

다. 실험 방법

6가지 다른 형태의 태양 복사열 차단 장치에 USB 온습도 데이터 로거를 넣고 건물의 옥상 위, 잔디밭 위, 온실 내에서 각각 온도 측정을 시도하였다. 실험 위치는 건물 옥상의 경우 도시 환경 조건을, 잔디밭의 경우 표준 기상 측정 환경을, 온실 내의 경우 온실 환경을 대표하여 선정하였다. 실험 장치의 가운데 일사량계를 설치하여 일사량 데이터도 획득하여 일사량의 영향을 확인하는데 활용하였다. 각각의 실험 사진은 다음 그림 26와 같다.



<옥상 실험>

<잔디밭 실험>

<온실 실험>

그림 26. 복사열 차단 장치 성능 평가를 위한 장소별 실험 사진

실험은 맑은날 오전 11시에서 오후 2시 사이에 1시간씩 진행되었고, 높이를 50, 100, 150 cm로 조절하면서 높이에 의한 복사열 영향도 분석되었다.

라. 실험 결과

태양 복사열 차단장치의 형태에 따른 복사열 차단효과를 확인한 실험의 결과는 다음의 그림 27과 같다.

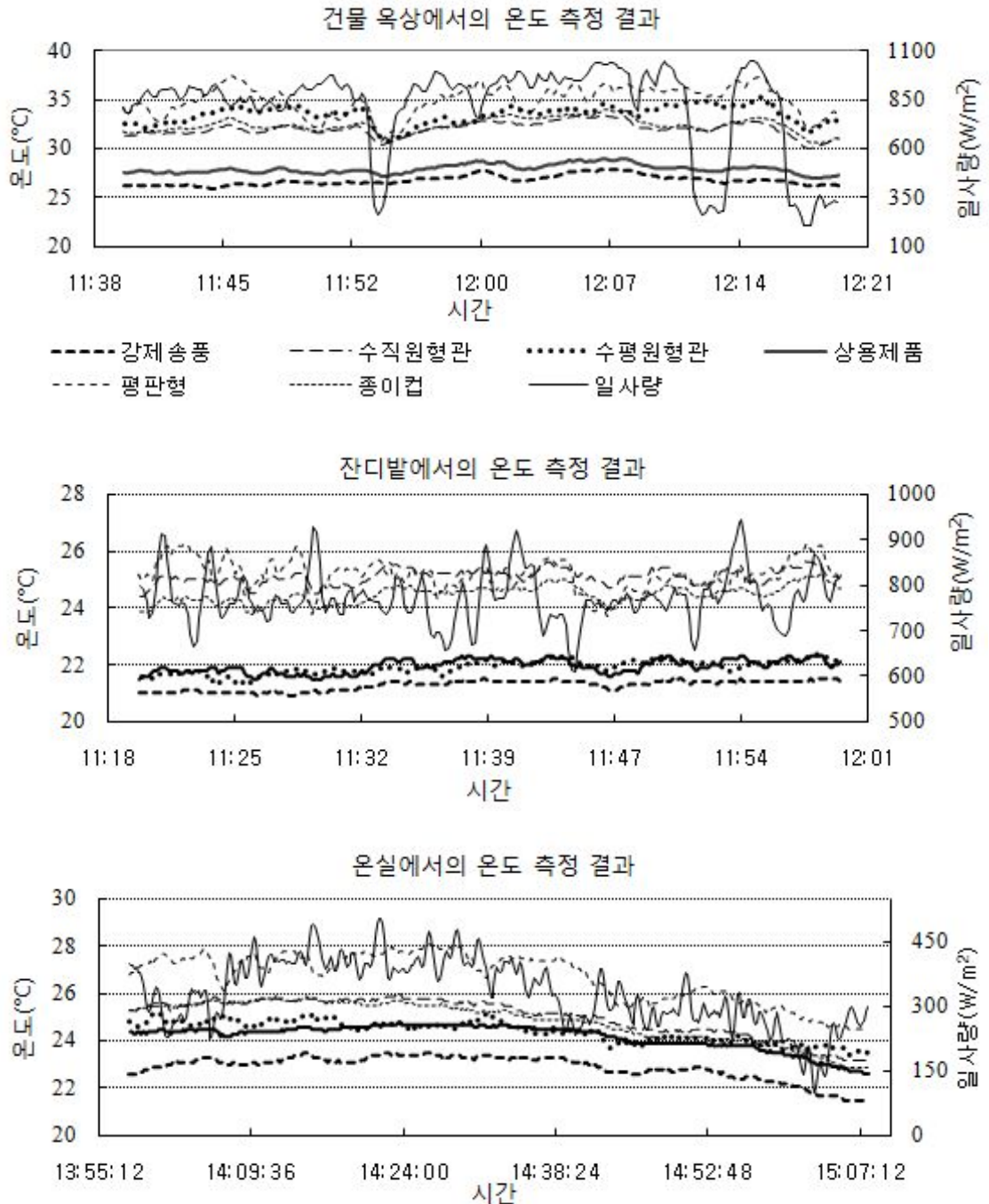


그림 27. 실험 장소에 따른 태양 복사열 차단장치의 형태에 따른 복사열 차단효과

종이컵, 수평원형관, 수직원형관, 평판형 등은 상용 제품 및 강제 송풍 방식에 비하여 최대 11.2°C 까지 높은 온도를 측정하였다. 반면 상용 제품과 강제 송풍 방식의 경우는 측정된 온도

값에 큰 차이가 없었지만 온실에서는 상대적으로 큰 차이를 보였다. 이와 같은 결과는 온실 내 환경의 경우 공기의 유동이 외부에 비하여 적기 때문에 자연 환기에 의존하여 온도 측정 에러를 보상받는 상용 제품의 한계를 보여준다. 따라서, 온실의 정확한 건구온도 측정을 위해서는 상용 제품보다 강제 송풍식 장치를 고안하여 이용하는 것이 필요하다.

제 3 절 에너지 절약형 환경 관리 기계 개발

1. 하이브리드 히트펌프 시스템의 개발

가. 1차 히트펌프 프로토타입 제작 및 성능 평가

(1) 설계

히트펌프는 기본적으로 압축기, 응축기, 팽창기, 증발기로 구성되며 응축기에서는 열을 방출하는 역할을 수행하고, 증발기에서는 열을 흡수하는 역할을 수행한다. 따라서 히트펌프를 냉난방 겸용으로 수행하기 위해서 기존에는 냉매의 흐름을 바꾸어가면서 응축기와 증발기의 역할을 바꾸어가면서 활용하였다. 하지만 이와 같은 경우 효율의 감소가 뒤따르고, 냉매의 흐름을 바꿔주기 위한 추가적인 설계 및 부품들이 소요되고, 구조가 복잡해지는 문제가 있다.

본 연구에서 구상하는 히트펌프 시스템도 냉방(열회수)과 난방이 동시에 수행되어야 하지만, 축열식 시스템으로 설계하여 이와 같은 문제를 해결하였다. 다음 그림 28은 히트펌프의 기본 설계도로써 콤프레서를 중심으로 수열 증발기와, 수열 응축기, 팽창기, 유수분리기가 그 주요 부품이고, 추가적으로 공기열을 이용하기 위한 공기열 증발기가 설계되었다. 하지만 2차 설계에서는 추후에 히트펌프 구성의 간결화를 위해서 공기열 증발기는 배제되었다.

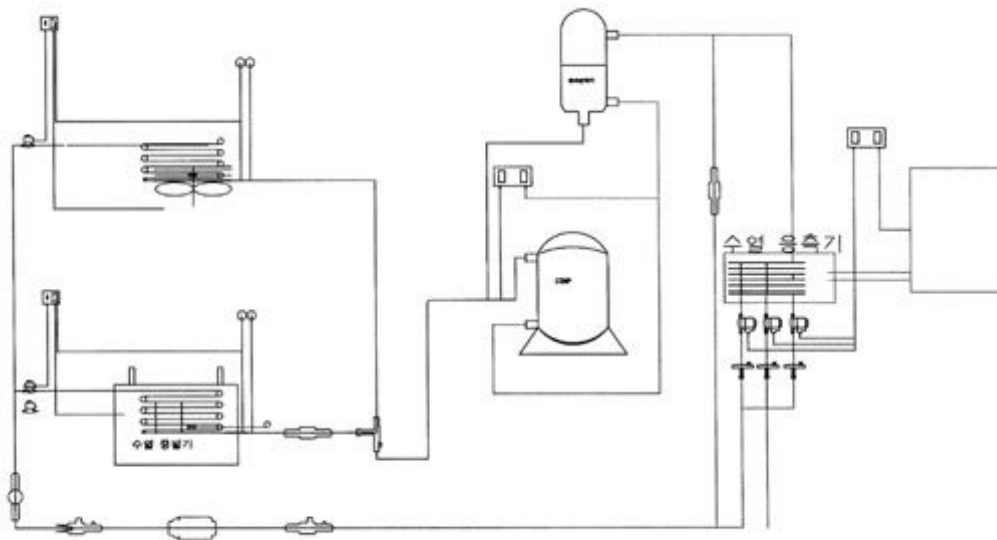


그림 28. 히트펌프의 기본 설계도

증발기를 위한 열교환기는 알루미늄 소재를 이용하여 가볍고 열팽창에 잘 견디도록 제작을 시도하였다. 열교환기는 자동차 라지에이터 기술을 응용하여 다수의 박막편이 열교환 효율을 극대화 할 수 있는 구조로 제작되었다. 설계된 열교환기의 도면은 그림 29과 같다.

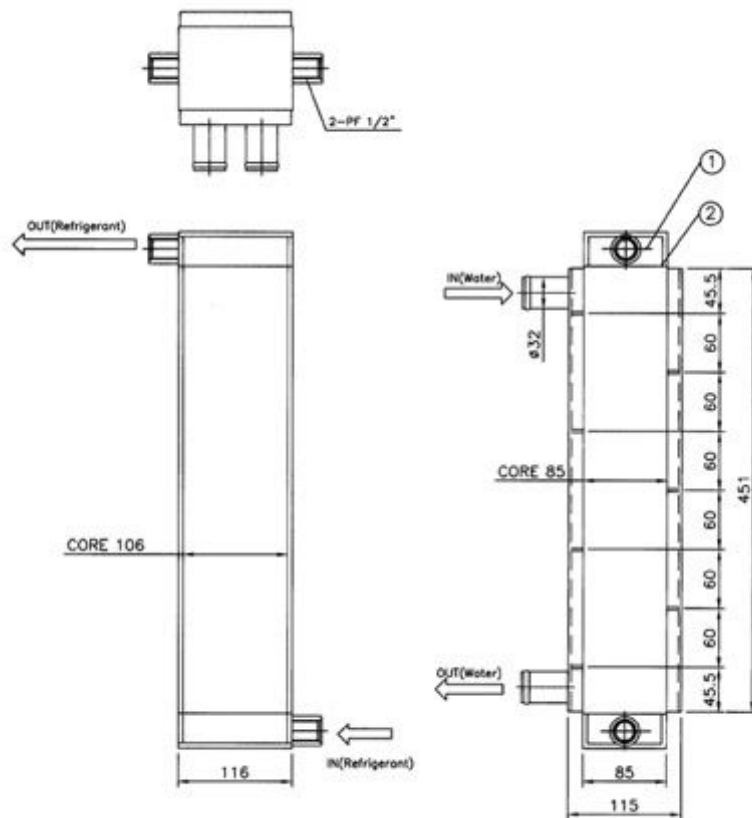


그림 29. 히트펌프용 열교환기 설계도

(2) 1차 히트펌프 프로토타입 제작

히트펌프의 프로토타입이 다음 그림 30과 같이 제작되었다. 제작된 히트펌프 프로토타입은 기본적인 구성품인 압축기, 응축기, 팽창기, 증발기 외에 유수분리기와 필터, 잔열 회수기 등을 장착하였다. 내부에 장착된 증발기는 본 연구에서 개발하여 제작한 것으로 그 모습은 그림 31에 보여지는 것과 같다.



(a) 히트펌프 프로토타입 내부



(b) 저압, 고압부 압력계

그림 30. 제작된 히트펌프 프로토타입



(a) 제작된 히트펌프용 열교환기 외형



(b) 내부의 박막 열교환 핀

그림 31. 제작된 히트펌프용 열교환기

(3) 1차 히트펌프 프로토타입의 성능 평가

1차 히트펌프 프로토타입의 성능은 COP로 분석해본 결과는 다음 그림 32과 같다. 그림에서 보는 것과 같이 냉각 COP와 가열 COP는 각각 0.14 ~ 0.19, 1.17~ 1.34로 산출되었고, 평균은 0.17과 1.27 이다. 히트펌프의 성능 기준을 COP 3.0으로 볼 때 제작된 히트펌프의 성능은 만족스럽지 못하다. 이와 같은 결과는 제작된 알루미늄 증발기의 열량 부족에 의한 현상으로 파악

되었다. 또한 지하수를 열매체로 사용할 경우 알루미늄 부식이 가속되는 현상이 있는 것으로 파악되어 알루미늄이 지하수를 열매체로 쓰이는 농업용 히트펌프에서는 적합하지 못한 것으로 판단되었다. 따라서 증발기의 개선을 수행하였다.

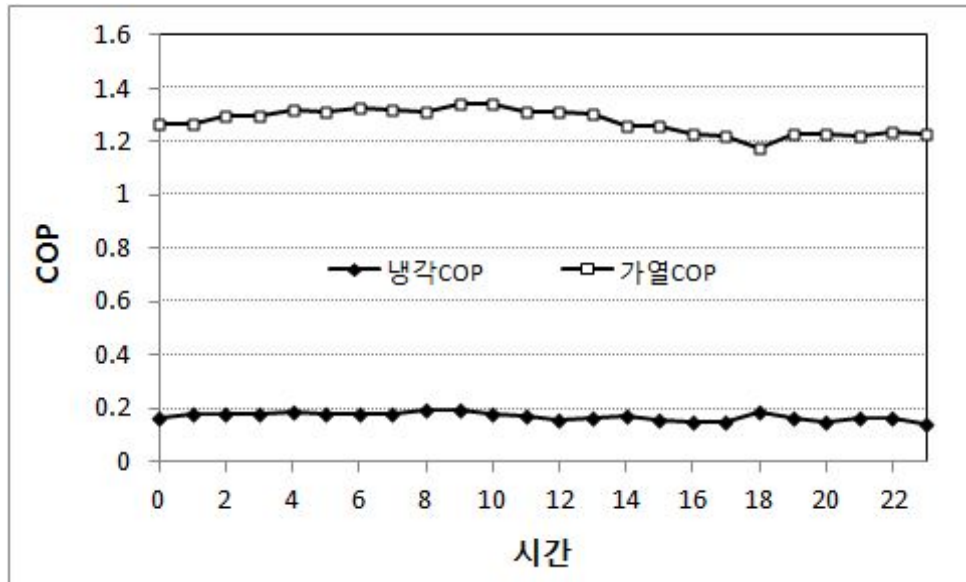


그림 32. 1차 히트펌프 프로토타입의 성능

나. 개선된 2차 히트펌프의 제작

(1) 설계

2차 히트펌프의 제작은 단순한 구조의 안정적인 운영이 가능한 히트펌프 제작에 초점을 두어 개발되었다. 용량은 초기 개념설계에서 수행한 결과를 바탕으로 6.5 kW 급 압축기를 이용하는 것으로 하고 최적 부품을 선정하였다. 또한 안정적인 작동을 위한 추가 부품들을 선정하여 설계하였다. 설계된 히트펌프는 다음 그림 33과 같다. 증발기와 응축기는 35 kW, 27 kW의 판형 열교환기로 선정하였고, 팽창밸브는 27 kW 급으로 선정하였다. 냉매는 R-22로 선정하였다. 주요 부품들의 세부 사양은 표 6과 같다.

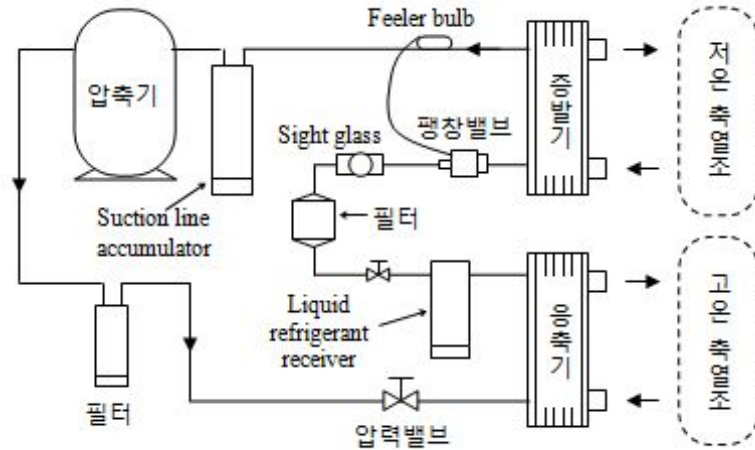


그림 33. 2차 히트펌프 설계도

표 6. 2차 히트펌프의 주요 부품 사양

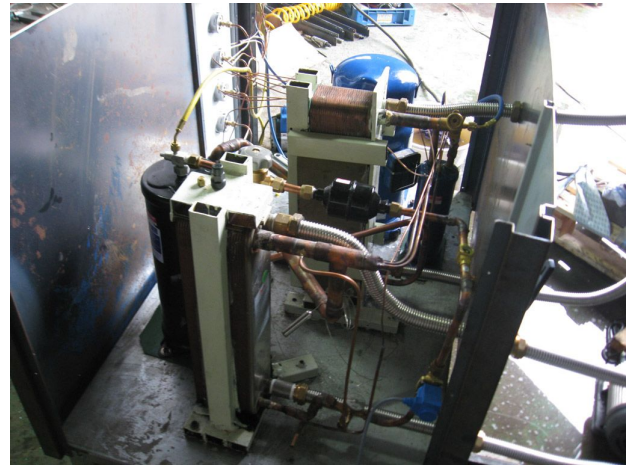
부품	사 양	용도	제조사 / 모델
압축기 (Compressor)	Capacity : 6.5kW Refrigerant : R22 LP : 25 bar, HP : 27.8 bar	냉매 압축	Danfoss / SM084S9VC
증발기 (Evaporator)	Plate heat exchanger 35.0kW at 46 kPa Heat exchange area : 2.8 m ²	열회수	Danfoss / B3-052-54-3.0-H Q
응축기 (Condenser)	Plate heat exchanger 27.0 kW at 98 kPa Heat exchange area : 1.5 m ²	열공급	Danfoss / B3-030-50-3.0-H Q
액냉매 수액기 (Liquid refrigerant receiver)	Refrigerant : R12, R134A, R22 Max. Pressure : 500 psi	액냉매 저장	Kyungan Eng./ KRT-0750
어큐물레이터 (Accumulator)	Refrigerant : R12, R134A, R22 Max. Pressure : 500 psi	냉매역류 및 액냉매의 압축기 유입 방지	Kyungan Eng./ KA-0750
팽창변 (Expansion value)	27kW, 46 bar Refrigerant : R22 and R407C	냉매 팽창	Danfoss / 067N2156
필터 (Filter drier)	Volume : 0.122 L	수분제거필터	Danfoss / DML196

(2) 2차 히트펌프 제작 및 기초 테스트

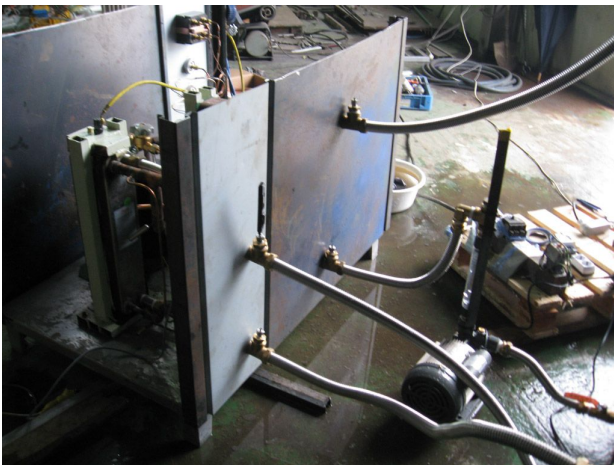
개선된 2차 히트펌프 제작 과정은 그림 33과 같다. 전면부(그림 34 (a))에는 압력설정 및 확인의 편의를 위해서 디지털 압력 스위치 (digipressure®)를 아날로그 압력계와 함께 장착하였고 저온 축열조, 고온 축열조와 연결되는 배관을 후면부(그림 34 (c))에서 연결할 수 있도록 제작하였다. 기초 성능 평가를 위해서 유량계와 전력량계를 장착하고 운영을 하였고 그 결과 COP가 응축부에서 3.13 ~ 4.52, 증발부에서 1.2 ~ 2.8 로 크게 향상되었다. 세부적인 성능 평가는 제 5 절 전체 시스템의 성능평가에서 다루었다.



(a) 히트펌프 전면



(b) 히트펌프 내부



(c) 히트펌프 후면



(d) 기초 성능 평가

그림 34. 2차 히트펌프 제작 과정 및 기초 테스트

2. 배기가스열 회수식 이산화탄소 발생기 개발

가. CO₂ 발생기의 설계

CO₂ 발생기의 경우 크게 연소실, 주 열교환기, 보조 열교환기, 축열탱크로 이루어진다. 연소실에서는 CO, NO_x 발생을 최소화하는 연소조건을 유지, 제어하고, 주 열교환기에서는 600°C 이상의 고온 가스를 300°C 수준으로 1차 냉각(열교환)을 하고, 보조 열교환기에서는 300°C 수준의 고온 가스를 25 - 30°C의 상온 수준으로 냉각한다. 보조 열교환기에서는 응축수가 발생하므로 응축수 처리 기능을 추가하였다. 다음 그림 35은 CO₂ 발생기의 구조와 분해도를 보여주며 실제 사진은 그림 36과 같다.

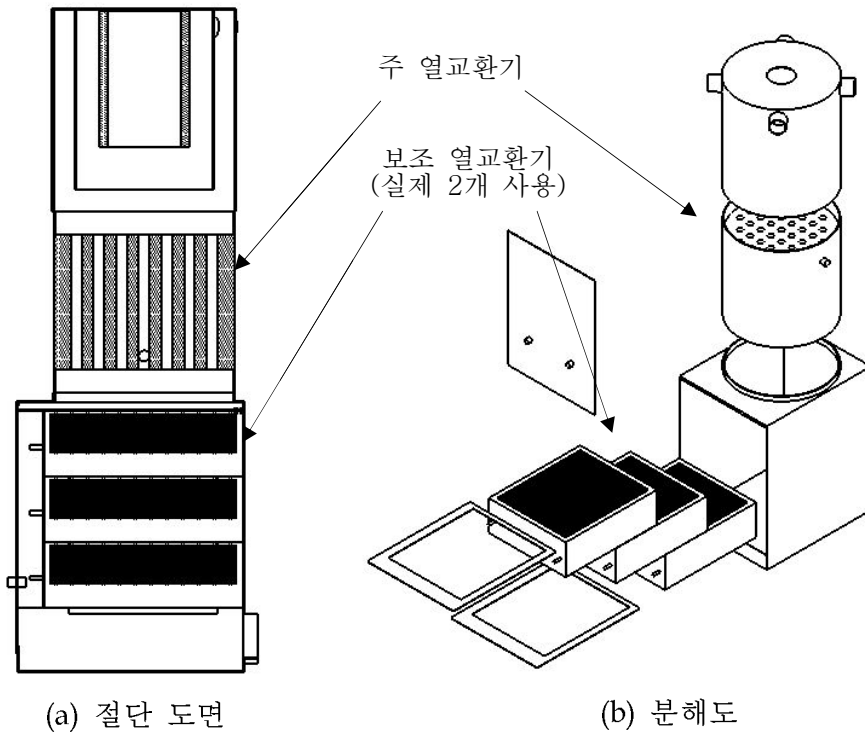


그림 35. CO₂ 발생기의 구조와 분해도



(a) 1차 조립 과정



(b) 제작 완료된 CO₂ 발생기

그림 36. 제작된 CO₂ 발생기의 사진

나. CO₂ 발생기의 자체 실험

(1) 연소실의 온도 변화 측정

CO₂ 발생기의 연소실 온도 변화를 1200°C 까지 측정이 가능한 K-type 열전대 온도계를 이용하여 측정하였다. 완전 연소를 위해서는 연소조건이 일반적으로 800°C 이상이 되어야 하는데 본 장치의 경우 2분 이내에 완전연소 조건에 도달하고 1100°C 정도에서 연소실 온도가 안정화 되는 것으로 확인되었다(그림 37).

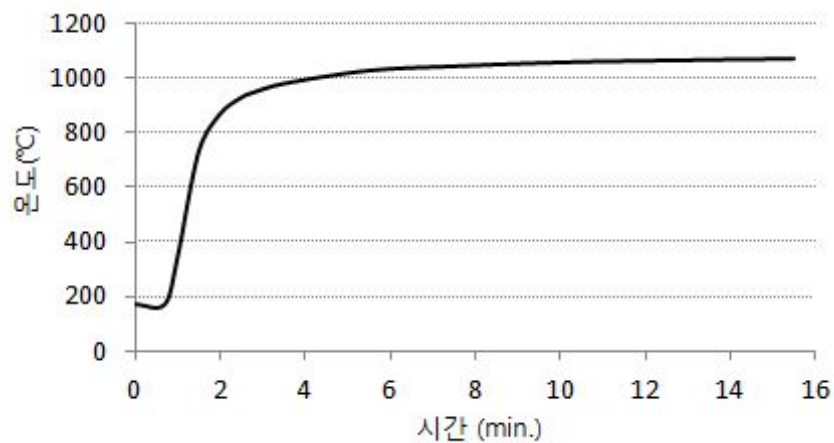


그림 37. 시간에 따른 CO₂ 발생기의 연소실 온도 변화

(2) 주 열교환 장치의 열교환 효과 측정

주 열교환 장치의 열교환 효과를 측정하기 위하여 열교환 장치의 입구, 출구의 표면 온도를 측정하였다. 축열조에 저장된 물을 순환하여 열교환을 시도하였기 때문에 점진적인 온도의 상승 효과가 있었다. 초기 27.0°C 정도의 축열조의 수온은 약 30분 뒤 36.2°C까지 상승하였다. 특이할 점은 수온이 올라갈수록 열교환기 입/출수 온도차이가 커지고 있는 점이 발견되었다(그림 38).

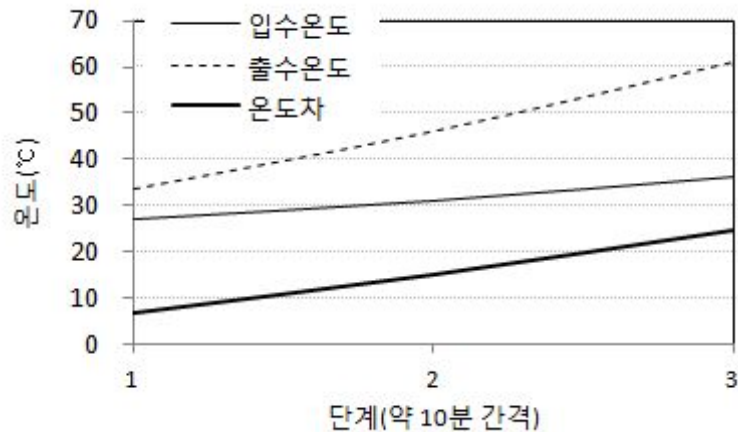


그림 38. 시간에 따른 주 열교환 장치의 열교환 효과

순환 펌프의 유량 15 L/min를 적용하여 열교환 열량은 다음 식(5)를 이용하여 계산해 볼 수 있다.

$$q = c \times m \times \Delta T \quad (5)$$

위 식에서 q 는 열 교환량 (cal/min)이고 c 는 물의 비열 (1 cal/g·°C), m 은 유량 (15000 g/min), ΔT 는 입출수의 온도차이다. 이 때 입출수 온도차를 15°C로 하면 계산된 흡수 열량은 시간당 약 13,500 kcal 였고, 사용된 LPG 버너의 용량이 20,000 kcal 인 것으로 미루어 보아 개발된 CO₂ 발생기의 주 열교환 장치의 열교환 효율은 약 67.5%정도 인 것으로 확인되었다.

(3) 소형 온실 내 CO₂ 농도 변화 효과 측정

실제 실험 온실에 개발된 CO₂ 발생장치를 장착하기 전에 72 m² (약 20 평) 면적의 소형 온실에서 CO₂ 농도 상승효과를 측정하였다. 총 34분간의 CO₂ 발생장치 작동 결과 온실 내 CO₂ 농도는 초기 724 ppm에서 3241 ppm까지 상승하였고 온도는 약 5.6°C 증가, 상대습도는 약 8.8% 감소하였다. 일반적인 온실의 목표 CO₂ 농도인 1500 ppm에 도달하기까지 약 16분 정도 소요되었다. 시간에 따른 CO₂농도, 온습도의 변화는 그림 39에서 보여지는 것과 같다. CO₂ 농

도가 선형적으로 증가하는 것으로 미루어 보아 1 ha 온실에 본 장치를 활용할 경우 약 3.7 시간 만에 1500 ppm에 도달할 수 있을 것으로 예상된다.

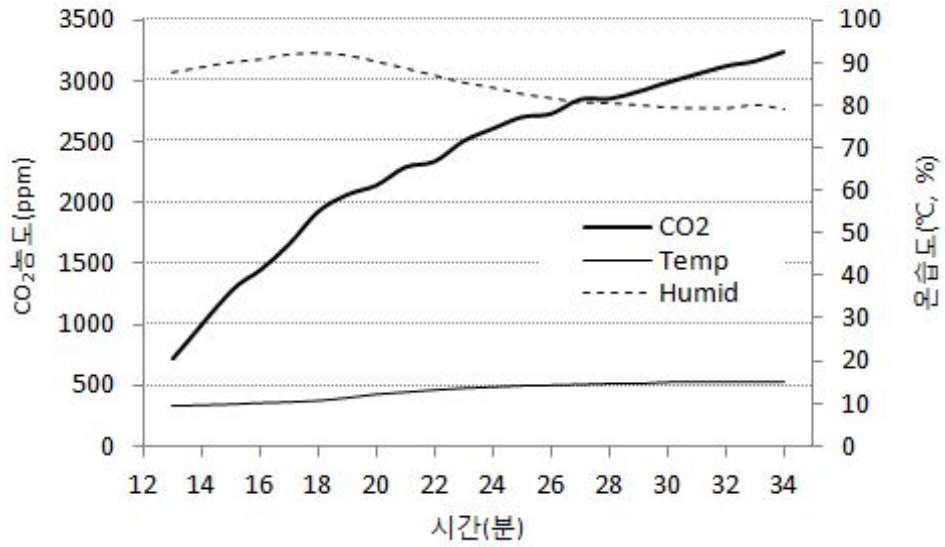


그림 39. CO₂ 발생기 작동 시간에 따른 소형 온실 내 CO₂농도, 온도, 습도의 변화

3. 유비쿼터스 에너지 통합 관리 시스템의 개발

가. 개요

에너지 통합 관리 시스템은 개발된 온실 시스템의 모든 장비들을 효과적으로 운영하기 위한 장치로써 히트펌프, 난방 및 열회수, 탄산가스 발생기, 보광, 보조열원을 통합하여 제어하게 된다. 특히 필요한 만큼의 최소한의 에너지를 사용하기 위하여 계절에 따라 각기 다른 운영 설정을 하게 된다. 또한, 개발된 온실 시스템에서 사용되는 모든 에너지를 실시간으로 모니터링 하여 현재 사용되고 있는 에너지량, 시간별, 일별 사용한 에너지량과 비용을 산정하여 보여 줄 수 있도록 개발되었다.

에너지 통합관리 시스템은 에너지 장비(히트펌프, 난방 및 열회수, 탄산가스 발생기, 보광, 보조열원)를 제어할 수 있는 제어 및 통신 장치와 에너지 사용량을 측정하는 계측장치, 계측값들을 전송해주는 통신 보드, 마지막으로 각종 장치의 작동 상태값, 측정된 모든 데이터 값을 표시하고 DB에 기록해 주는 에너지 통합관리 운영 프로그램으로 구성된다. 특히 에너지 통합관리 운영 프로그램은 다음에 설명할 유비쿼터스 복합 온실 환경-에너지 관리 프로그램과 연동하여 언제 어디서나 온실의 모든 상태를 모니터링하고 제어할 수 있게 된다.

나. 에너지 통합 제어 및 통신 장치

에너지 통합 제어 및 통신 장치는 크게 3가지 부분으로 나누어진다. 첫 번째가 제어를 위한 온실 환경 계측부, 두 번째가 개별 기계 장치 제어를 위한 릴레이 제어부, 세 번째가 연소열 회수식 CO₂ 발생기, 히트펌프 시스템, 서버 컴퓨터와 연계 작동하기 위한 통신부이다. 이와 같은 제어 시스템을 개발하기 위해서 8bit 마이크로컨트롤러유닛(Microcontroller unit, MCU)인 ATmega128을 이용하여 제어회로를 구성하였다. ATmega128은 6개의 8bit 병렬 입출력 포트를 갖고 있어서 다양한 장치 제어에 적합하고, 아날로그-디지털(AD) 변환기를 내장하여 온실 내 환경을 계측하여 제어 데이터로 활용하기에 적합하다. 통신을 위해서는 RS485통신 방식을 선정하였다. RS485통신은 두 가닥의 통신선을 이용하여 데이터를 주고받는 방식으로 동시에 양방향 통신이 수행되지 않지만 접지선이 필요하지 않아서 회로 구성이 간단하고, 최대 10 Mbps의 통신 속도와 최대 1.2 km에서의 통신이 가능한 장점을 갖고 있다. 또한 마스터 장치와 슬레이브 장치간의 데이터 통신 방식이기 때문에 하나의 중앙 제어 시스템에 다수의 환경 제어 장치 및 컴퓨터를 연결하여 사용하기에 용의하다.

(1) 계측 및 제어 회로 설계

다음 그림 40는 ATmega128 MCU에서 본 개발에 이용된 포트를 보여준다. AD변환 포트인 PF의 0 - 3번 포트를 NTC10k Ω 를 이용한 온도 계측에 활용하고, PC의 모든 포트를 릴레이 제

어를 위해 설계하였다. 통신회로는 2개의 회선을 준비하였는데 서버 컴퓨터와의 통신은 PD의 2 - 4 포트를 이용하여 수행하고, 환경 제어 장치들과의 통신은 PE의 0 - 2 포트를 이용하여 수행하도록 하였다.

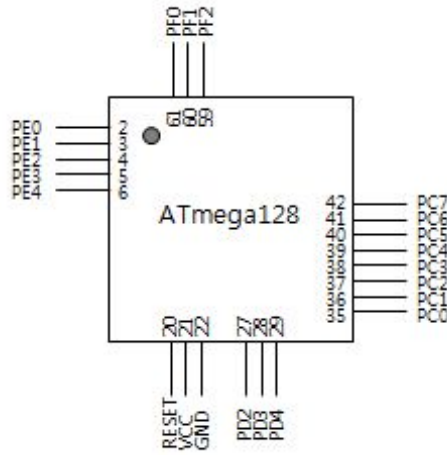


그림 40. ATmega128과 활용한 포트

온도 계측 회로는 그림 41에서 보여지는 것처럼 S1에 NTC10kΩ을 장착하여 이용하도록 하였다. 릴레이 제어 회로의 경우 하나의 포트를 이용하여 16개 릴레이를 제어할 수 있도록 하기 위해서 포트 확장 IC를 이용하여 설계하였다(그림 42). 따라서 PPE 포트의 선택에 따라서 1 ~ 8번 릴레이를 제어할 것인지 9 ~ 16번 릴레이를 제어할 것 인지를 결정하게 된다.

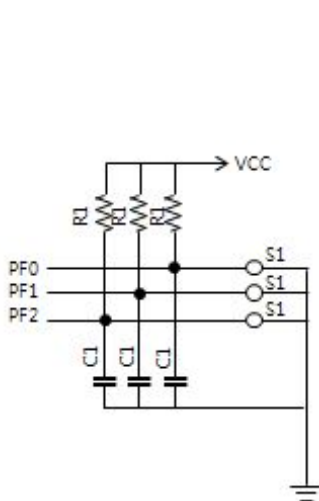


그림 41. 온도 계측 회로 (S1: 서미스터)

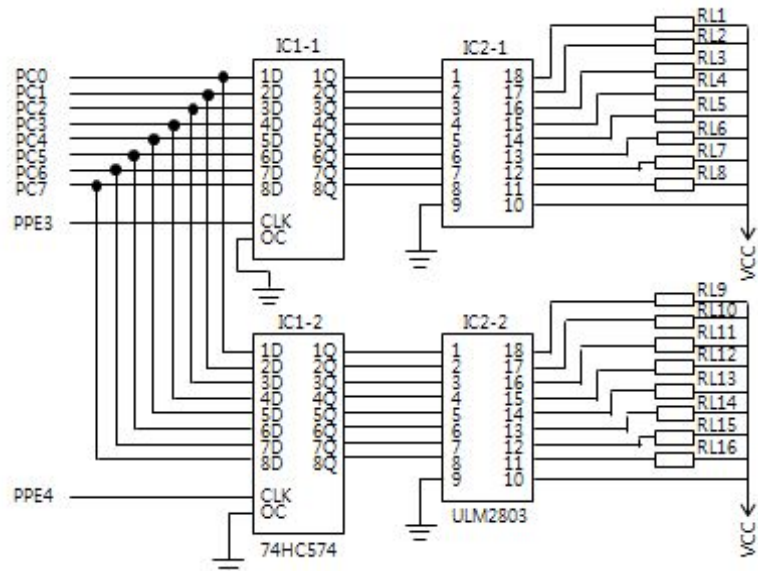


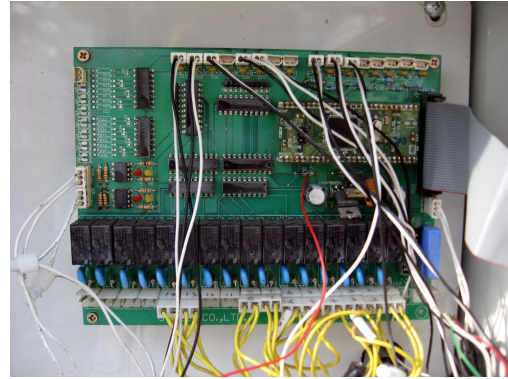
그림 42. 확장된 릴레이 제어 회로

전기히터나 물펌프 등의 고용량 기계를 제어하기 위해서는 회로에 장착된 릴레이에 고용량

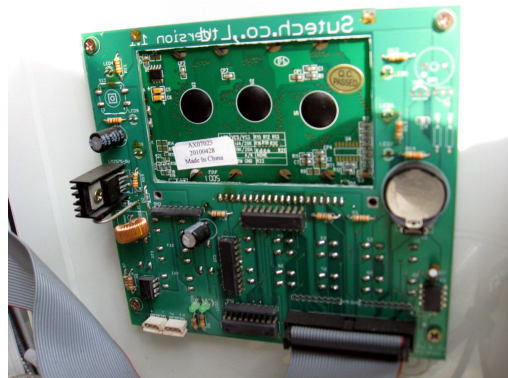
마그네트를 연결하여 제어를 수행하도록 제작하였다. 다음 그림 43 (a)는 제작된 에너지 통합 제어 장치의 외관을 보여주고 있고 그림 43 (b)는 앞서 설계한 회로를 구현한 결과인 통합 제어 및 통신 보드이다.



(a) 외관 및 작동 버튼



(b) 통합 제어 및 통신 보드



(c) LCD 및 버튼 처리 보드

그림 43. 에너지 통합 제어 장치

에너지 통합 장치 내부는 그림 44에서 보는 것과 같이 마그네트를 장착하여 고용량 개별 장치들을 제어할 수 있도록 구성하였다.



그림 44. 에너지 통합 제어 장치의 전기 설비 및 마크네트 설치 구조

(2) 통신 회로 및 프로토콜 설계

RS485 통신 회로를 총 2개를 설계하였는데 하나는 서버 컴퓨터와의 통신을 위한 것이고 다른 하나는 히트펌프 시스템과 이산화탄소 발생기와 통신하기 위한 것이다. 통신 회로는 DS75176을 이용하여 구성하였다 (그림 45).

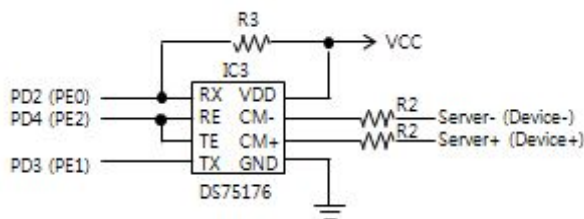


그림 45. RS485 통신 회로

통신 프로토콜은 PC와의 통신에서는 첫 번째 바이트를 0x06, 장치와의 통신에서는 0x05로 설정하여 시작을 구성하였다. 두 번째 바이트에는 데이터를 전송하려는 장치의 일련번호, 세 번째 바이트는 보내는 장치의 일련번호, 그 다음 바이트부터 설정값 및 환경 계측값을 전송하고 마지막에 전송을 마친다는 신호로 0x04, 그리고 총 전송 데이터의 길이를 보내도록 설계하

였다. 그 구성을 정리하면 다음 표 7과 같다.

표 7. 통신 프로토콜의 구성

Wake-up signal	Slave ID	Master ID	Data	End signal	Data length
1 byte	1 byte	1 byte	47 byte	1 byte	1 byte

(3) 개별 장치간의 통신 프로토콜

복합 온실 환경-에너지관리 시스템은 독립적인 단위기체들이 유기적인 시스템으로 결합되어 상호간 양방향 제어 및 작동 신호를 주고받으며 작동해야한다. 따라서 이에 필요한 제어신호와 작동 데이터의 프로토콜을 협의해야 한다. 에너지 통합 제어 시스템는 개별 장치들로부터 정상 작동여부 및 에너지 사용 정보 등을 획득하여 인터넷으로 확인할 수 있도록 하고, 에너지 통합 제어 시스템는 개별 장치들에게 목표 환경 설정값을 전달해주면 개별 장치들은 독자적으로 설정값 유지를 위하여 운영된다. 개발한 개별 장치간의 통신 프로토콜 세부 규약은 다음 표 8 ~ 13와 같다.

표 8. WriteProtocol (개별 장비에 명령 전달)

BYTE	내용	코드
COMMAND	ENQ,국번,"W", (14),BCC,ETX	온실종합관리시스템에서쓰기
ACK	ACK,국번,"W",BCC,EOT	쓰기 정상 확인
NAK	NAK,국번,"W"BCC,EOT	쓰기 에러 확인

표 9. ReadProtocol (개별 장비에 상태값 요청)

BYTE	내용	코드
COMMAND	ENQ,국번,"R",BCC,ETX	온실종합관리시스템에서쓰기
ACK	ACK,국번,"R", (28),BCC,EOT	개별장비 or 에너지제어기

표 10. 에너지 통합 제어 시스템 → CO₂발생기

번호	내용	메모리할당(Byte)	값형식
1	CO ₂ 설정 농도	2	Integer
2	CO ₂ 현재 농도	2	Integer
3	현재 일시	4	Datetime

표 11. CO₂발생기 → 에너지 통합 제어 시스템

번호	내용	메모리할당(Byte)	값형식
1	상태신호 (작동, 정지, 경고, 고장 등)	1	Short
2	LPG사용량 (적산량)	2	Real
3	전기사용량 (적산량)	2	Real

표 12. 에너지 통합 제어 시스템 → 하이브리드 히트펌프

번호	내용	메모리할당(Byte)	값형식
1	설정 온도	2	Integer
2	현재 온도	2	Integer
3	현재 일시	4	Datetime

표 13. 하이브리드 히트펌프 → 에너지 통합 제어 시스템

번호	내용	메모리할당(Byte)	값형식
1	상태신호 (작동, 정지, 경고, 고장 등)	1	Short
2	히트펌프 전기사용량 (적산량)	2	Real
3	비상열원 전기사용량 (적산량)	2	Real
4	기타 전기사용량 (적산량)	2	Real

다. 에너지 사용량 측정 장치

에너지 통합 제어 및 분석을 위해서 기록하는 데이터는 다음 표 14에 정리 하였다. 냉난방 장치, 히트펌프, CO₂발생기의 에너지 분석을 위해 온도와 유량, 가스량을 측정하고, 개별 장치에서 소모되는 전력량을 계측할 수 있도록 하였다.

계측을 위한 장치들을 각각 선정하였는데, 각각의 사양은 표 15와 같고 센서들의 형태는 그림 46와 같다.

표 14. 에너지 통합 관리 시스템에서 기록 중인 데이터

장치 구분	측정 항목	세부 항목
냉난방 장치	온도 (6포인트)	냉·난방 입·출수 온도, 온실 내부 및 토양 온도
	유량 (2포인트)	냉방 유량, 난방 유량
히트펌프	온도 (6포인트)	고온 물탱크 및 저온 물탱크 상, 중, 하 온도 방열기 입·출수 온도
	유량 (3포인트)	응축기, 증발기 유량, 방열기 유량
탄산가스 발생기	온도 (6포인트)	연소온도, 1·2차 열교환 온도, 온실 공급온도 냉각수 입·출수 온도, LPG통 온도
	유량 (2포인트)	냉각수 유량, LP가스 유량
전력량	전력량 (6포인트)	히트펌프, 냉난방, 보광, 보조열원, CO ₂ 발생기, 기타

표 15. 에너지 통합 제어 및 평가를 위해 선정된 센서

센서종류	모델/형태	용도	제조사
온도	NTC-10kΩ	입출수 온도, 기계실 온도	-
물유량	접선류 익차형 최대유량(m ³ /hour) : 2, 2.5, 5	온실냉난방, 히트펌프 시스템의 유량 측정	신일미터텍
가스량(LPG)	2.4 m ³ /hour (10L 단위 계측)	탄산가스 발생기 LPG 사용량 측 정	신일미터텍
전력량	OMWH-121(단상) OMWH-344(3상)	히트펌프, 보광, 보조열원, 냉난 방, CO ₂ 기, 기타 전력량 계측	옵니시스템



그림 46. 에너지 통합 제어 및 평가를 위해 선정된 센서의 형태

라. 서버용 통신 프로그램 및 데이터베이스

(1) 통신 및 모니터링 프로그램

에너지 통합 제어 장치로부터 계속되는 에너지관련 데이터와 히트펌프의 작동 상황, CO₂ 발생기의 작동 상황은 에너지 통합 제어의 통신 회로를 거쳐서 서버 컴퓨터로 전달된다. 이 때 이 데이터를 수집하고 화면에 보여주기 위한 프로그램을 개발하였고 그 화면은 그림 47과 같다.

서버용 통신 프로그램은 에너지 통합 제어 장치에서 보내오는 모든 데이터를 6번에 걸쳐서 획득하게 된다. ① 에너지 제어 장치 자체와 ② CO₂ 발생기에서 전달되어 오는 데이터, ③ 히트펌프에서 전달되는 데이터, ④ 전력량, ⑤ 온도 데이터, ⑥ 유량 데이터가 각각 나눠서 통신을 시도하게 된다.



그림 47. 에너지 통합 제어 장치와 서버 컴퓨터와의 통신 프로그램

(2) 데이터베이스 설계

통신 프로그램이 획득한 데이터는 데이터베이스에 저장되게 된다. 데이터베이스는 무료로 배포되는 MySQL 5.0을 이용하여 구축되었다. 자료 저장을 위해서 테이블을 2개 설계하였고, 제어를 위해서 1개의 테이블을 설계하였다. 각각의 테이블 명세는 표 16 ~ 18 에 정리하였다. 따라서 통신 프로그램이 획득한 데이터 중에서 환경 계측과 관련한 데이터는 envdata 테이블(표

16)로 저장되고, 에너지 제어와 관련된 데이터는 systemdata 테이블(표 18)로 저장된다. 또한 통신 프로그램은 주기적으로 control 테이블(표 17)을 조회하여 변경 사항이 있을 시에는 변경된 설정값을 에너지 통합 제어 장치로 보내져서 에너지 제어에 쓰이거나 히트펌프 또는 CO₂ 발생기로 전달되어 새로운 제어 설정값 하에서 작동이 시작된다.

표 16. envdata 테이블 (환경 데이터 저장)

번호	필드명	형식	설명
1	rec_date	datetime NOT NULL	기록 시간
2	temp_in1	float default NULL	실험온실 내부 온도 1
3	temp_in2	float default NULL	실험온실 내부 온도 2
4	temp_out	float default NULL	외부 온도
5	co2	float default NULL	실험온실 CO ₂ 농도
6	humid	float default NULL	실험온실 상대습도
7	solar	float default NULL	외부 일사량
8	w_spd	float default NULL	외부 풍속
9	w_dir	float default NULL	외부 풍향 (0 ~ 359°)
10	temp2	float default NULL	대조온실 내부 온도
11	co2_2	float default NULL	대조온실 CO ₂ 농도
12	humid2	float default NULL	대조온실 상대 습도
13	light	float default NULL	실험 온실 보광 작동 유무 (1:작동, 0:꺼짐)

표 17. Control 테이블 (제어 설정값 저장)

번호	필드명	형식	설명
1	num	int(1) NULL default '0'	1:제어값(한개만 존재), 2:제어값 로그(여러개 존재)
2	rec_date	datetime NOT NULL	기록 시간 (참고 데이터, 이용하지 않음)
3	cooling_status	int(1) NULL default '0'	냉방(열회수) 팬 상태; 0:OFF(끄기), 1:ON(켜기), 2:AUTO (*)
4	cooling_temp_st	float NULL default '0'	냉방(열회수) 온도 조건1; 냉방 시작 온도 (이 온도가 되면 냉방 시작)
5	cooling_temp_gap	float NULL default '0'	냉방(열회수) 온도 조건1 간격; 냉방 정지 온도 (이 온도 만큼 떨어지면 냉방 시작)
6	cooling_temp_ed	float NULL default '0'	냉방(열회수) 온도 조건2; 냉방 종료 온도 (이 온도를 넘으면 냉방 중지 - 너무 더우면 냉방 소용없음)
7	heating_status	int(1) NULL default '0'	난방 물펌프 상태; 0:OFF(끄기), 1:ON(켜기), 2:AUTO (*)
8	heating_temp_st	float NULL default '0'	난방 온도 조건; 난방 시작 온도 (이 온도가 되면 난방 시작)
9	heating_temp_gap	float NULL default '0'	난방 온도 조절 간격; 난방이 꺼질 때까지의 온도 (데드존)
10	heating_sub_temp	float NULL default '0'	보조 난방 온도; 보조 난방 시작 온도 (이 온도가 되면 보조 난방기 작동)
11	heating_sub_gap	float NULL default '0'	보조 난방 온도 조절 간격; 보조 난방이 꺼질 때까지의 온도 (데드존)
12	co2_status	int(1) NULL default '0'	CO2기 상태; 0:OFF(끄기), 1:ON(켜기), 2:AUTO (*)
13	co2_conc	float NULL default '0'	CO2기 농도 조건; 목표 농도
14	co2_gap	float NULL default '0'	CO2기 농도 조절 간격; 다시 작동시 까지의 농도 차이 (데드존)
15	light_status	int(1) NULL default '0'	보광 상태; 0:OFF(끄기), 1:ON(켜기), 2:AUTO (*)
16	light_control	int(1) NULL default '0'	보광 제어; 0:OFF(끄기), 1:ON(켜기)
17	hp_status	int(1) NULL default '0'	히트펌프 콤프레셔 상태; 0:OFF(끄기), 1:ON(켜기), 2:AUTO (*)
18	hp_low_temp	float NULL default '0'	히트펌프 저온탱크 최저온도; 이 온도 이하로 떨어지면 히트펌프 정지
19	hp_low_gap	float NULL default '0'	히트펌프 저온탱크 온도 조절 간격; 해당 온도만큼 올라가면 다시 작동 (데드존)
20	hp_high_temp	float NULL default '0'	히트펌프 고온탱크 최고온도; 이 온도 이상으로 올라가면 히트펌프 정지
21	hp_high_gap	float NULL default '0'	히트펌프 고온탱크 온도 조절 간격; 해당 온도만큼 떨어지면 다시 작동 (데드존)
22	hp_rad_temp	int(1) NULL default '0'	방열기 작동 온도; 고온탱크의 온도가 이 온도보다 높으면 방열기 작동
23	hp_rad_gap	int(1) NULL default '0'	방열기 작동 온도 간격; 이 온도 이상으로 떨어지면 작동 중지 (데드존)

(*) 참고만 하는 값임, 읽어갈 필요 없음

표 18. systemdata 테이블 (에너지 통합 제어 데이터 저장)

번호	필드명	형식	설명
1	rec_date	datetime default NULL	기록 일시
2	el_comp	double default '0'	전력량 - 히트펌프 (kWh)
3	el_light1	double default '0'	전력량 - 보광 1 (kWh)
4	el_light2	double default '0'	전력량 - 보광 2 (kWh)
5	el_heater	double default '0'	전력량 - 전기히터 (kWh)
6	el_pump	double default '0'	전력량 - 펌프, 팬 (kWh)
7	el_other	double default '0'	전력량 - CO ₂ 기, 기타 (kWh)
8	temp_tankh	float default '0'	온도 - 고온 축열조 (°C)
9	temp_tankl1	float default '0'	온도 - 저온 축열조1 (°C)
10	temp_tankl2	float default '0'	온도 - 저온 축열조2 (°C)
11	flow_LPG	int(8)	유량 - LPG소모량 (10 L/pulse)
12	flow_cond	int(8)	유량 - 응축기 물순환량 (10 L/pluse)
13	flow_evap	int(8)	유량 - 증발기 물순환량 (10 L/pluse)
14	flow_co2	int(8)	유량 - CO ₂ 기 냉각수 순환량 (10 L/pluse)
15	flow_heat	int(8)	유량 - 난방 물순환량 (10 L/pluse)
16	flow_cool	int(8)	유량 - 냉방 물순환량 (10 L/pluse)
17	flow_radl	int(8)	유량 - 방열기 물순환량 (10 L/pluse)
18	temp_cond_i	float default '0'	온도 - 응축기 투입수 (°C)
19	temp_cond_o	float default '0'	온도 - 응축기 배출수 (°C)
20	temp_evap_i	float default '0'	온도 - 증발기 투입수 (°C)
21	temp_evap_o	float default '0'	온도 - 증발기 배출수 (°C)
22	temp_co2_i	float default '0'	온도 - CO ₂ 기 투입수 (°C)
23	temp_co2_o	float default '0'	온도 - CO ₂ 기 배출수 (°C)
24	temp_heat_i	float default '0'	온도 - 난방 투입수 (°C)
25	temp_heat_o	float default '0'	온도 - 난방 배출수 (°C)
26	temp_cool_i	float default '0'	온도 - 냉방 투입수 (°C)
27	temp_cool_o	float default '0'	온도 - 냉방 배출수 (°C)
28	temp_radl_i	float default '0'	온도 - 방열 투입수 (°C)
29	temp_radl_o	float default '0'	온도 - 방열 배출수 (°C)
30	temp_gh1	float default '0'	온도 - 온실 중앙 (°C)
31	temp_gh2	float default '0'	온도 - 온실 바닥 (°C)
32	temp_co2_1	float default '0'	온도 - CO ₂ 기 연소실 (°C)
33	temp_co2_2	float default '0'	온도 - CO ₂ 기 1차 열교환 후 (°C)
34	temp_co2_3	float default '0'	온도 - CO ₂ 기 온실 공급 (°C)
35	co2_gh	float default '0'	CO ₂ 농도 - 온실 중앙 (ppm)
36	stat_out_energy	int(8)	상태 - 에너지 통합 제어
37	stat_out_co2	int(8)	상태 - CO ₂ 기
38	stat_out_hp	int(8)	상태 - 히트펌프

마. 유비쿼터스 복합 온실 환경-에너지 관리 프로그램

앞서 설명한 에너지 통합 관리 시스템을 언제 어디서나 모니터링 하거나, 제어 및 설정값 변경을 할 수 있는 유비쿼터스 복합 온실 환경-에너지 관리 프로그램이 개발되었다. 유비쿼터스 복합 온실 환경-에너지 관리 프로그램은 환경 모니터링 및 기존에 수행해 오던 온실의 창 개폐를 수행할 수 있는 “온실 기본 설비 제어 프로그램”과 에너지 통합 관리 시스템에 연계된 장치들을 모니터링 및 제어할 있는 “에너지 통합 관리 프로그램”으로 나뉘어져 있다. 이는 두 개의 장치가 독자적으로 운영됨에 따라서 만일에 발생할 긴급 사항을 적극적으로 대처하기 위한 것으로 고온 또는 저온에 의한 작물의 피해가 발생할 수 있는 시기에 하나의 장비가 에러 및 사용불능 상태가 되었을 지라도 나머지가 최소한으로 피해를 방지해준다. 그 사이에 각 장비들은 운영자에게 문제 발생을 알려줌으로써 효과적으로 피해 상황에 대처 할 수 있다. 또한 상호간에 전원 리셋이 가능하기 때문에 정전 등의 상황에도 원격으로 대처가 가능하다.

마지막으로 스마트폰을 이용한 모니터링, 환경 제어장치 제어, 자동 운영 설정값 변경 등이 가능한 “모바일 프로그램”이 개발되어 진정한 유비쿼터스 온실 관리가 가능한 시스템이 구현되었다. 다음 표 19에는 실제로 확인해 볼 수 있는 프로그램 주소이고, 표 20에는 각 프로그램 별로 수행이 가능한 기능들을 정리하였다.

표 19. 복합 온실 환경-에너지 관리 프로그램 주소 (경기도 농업기술원 실험 온실)

프로그램	주소	비고
기본 프로그램	http://ebio.green-net.or.kr	
에너지 통합 관리 프로그램	http://ebio.green-net.or.kr:4610/	
모바일 프로그램	http://ebio.green-net.or.kr:4610/wap/index.jsp	스마트폰 웹 브라우저에서 접속

표 20. 프로그램에 따른 수행 가능 항목

	기본 프로그램	에너지 통합 관리 프로그램	모바일 프로그램 (스마트폰)
환경 및 카메라 조회	○	○	○
창 개폐	○		
냉난방 제어		○	○
CO ₂ 발생기 제어		○	○
히트펌프 제어		○	○
보광 제어		○	○
보조열원 제어		○	○
에너지 사용량 조회		○	○
기기별 에너지 사용량 조회		○	
기기별 성능 분석		○	
LPG잔량 확인			○

(1) 개발 환경

에너지 관리 프로그램은 언제 어디에서는 실험 온실의 현재 에너지 상태를 즉시 확인해 볼 수 있도록 웹 기반으로 개발하였다. 안정적인 프로그램 운영을 위해서 널리 안정성이 인정된 언어와 데이터베이스, 통신규약 등을 활용하였다. 개발에 활용된 웹 기반 프로그램의 구성은 개발 언어로 JAVA 1.6을 이용하였고 웹서버로는 Tomcat 6.0을 데이터베이스로 MySQL 5.0을 이용하였다. 실시간 통신을 위한 프로토콜로 XML을 활용하였고 웹에서 실시간 데이터 통신이 가능한 AJAX 기술을 활용하였다. 다음 표 21에는 각각의 개발 도구에 대한 상세한 설명을 추가 하였고 XML 통신 프로토콜의 구성은 그림 48과 같다

표 21. 프로그램 개발 환경 및 사양

구 성	사 양
서버 컴퓨터 시스템	CPU: Intel Core2 6600 @ 2.4GHz RAM : 1.0 GB Upload/Download speed : 3.35 Mbps / 561 kbps
운영체제(OS)	Windows XP
프로그램 언어	JAVA 1.6
Database	MySQL 5.0
웹서버	Tomcat 6.0
통신 프로토콜	XML [extensible markup language]
실시간 통신 기술	AJAX [Asynchronous JavaScript and XML]

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
- <greenhouse>
- <operating>
  <date>2010-08-08 11:19:21</date>
+ <electricity>
- <tank>
  <temp_tankh unit="C">47.8</temp_tankh>
  <temp_tankl1 unit="C">24.9</temp_tankl1>
  <temp_tankl2 unit="C">28.4</temp_tankl2>
</tank>
+ <flow>
+ <temperature>
</operating>
+ <energy>
- <environment>
  <date_env>2010-08-08 11:21:00</date_env>
  <temp_in1 unit="C">32.0</temp_in1>
  <temp_in2 unit="C">30.8</temp_in2>
  <temp_out unit="C">33.9</temp_out>
  
```

그림 48. 통신 프로토콜로 이용한 XML의 구성

(2) 온실 기본 설비 제어 프로그램

온실 기본 설비 제어 프로그램은 기존 관행 온실들에서 제어해온 온실의 기본 제어 요소인 축·천창의 개폐, 보온 스크린 작동, 차광막 작동 등을 수행한다. 이와 같은 제어는 에너지 통합 제어 시스템과는 별도로 독립 운영하게 되는데 그 이유는 에너지 통합 제어 시스템에 문제가

발생할 경우 기본 제어 장치들이 작동하여 작물의 피해를 최소화 할 수 있기 때문이다.

그림 49은 온실 기본 설비 제어 프로그램의 제어 상태 조회 화면으로 온실 외부의 온도, 일사량, 풍향, 풍속 그리고 온실 내부의 온도, 습도, CO₂ 농도를 실시간으로 보여 준다. 환경 데이터는 에너지 통합 제어 장치와도 공통으로 활용하게 된다. 온실 기본 설비 제어 프로그램에서는 창이 개폐 여부와 얼마나 개방 되었는가를 비율로 확인할 수 있다.



그림 49. 온실 기본 설비 제어 프로그램의 제어 상태 조회 화면

온실 기본 설비 제어는 온도를 기준으로 수행되는데 다음 그림 50는 온도 설정을 위한 화면의 구성을 보여 준다. 온실 기본 설비 제어 기능에 난방기 및 광 조절 기능이 있지만 본 연구에서는 에너지 통합 관리 프로그램에서 이를 총괄 제어하기 때문에 이 프로그램에서는 이용하지 않는다.

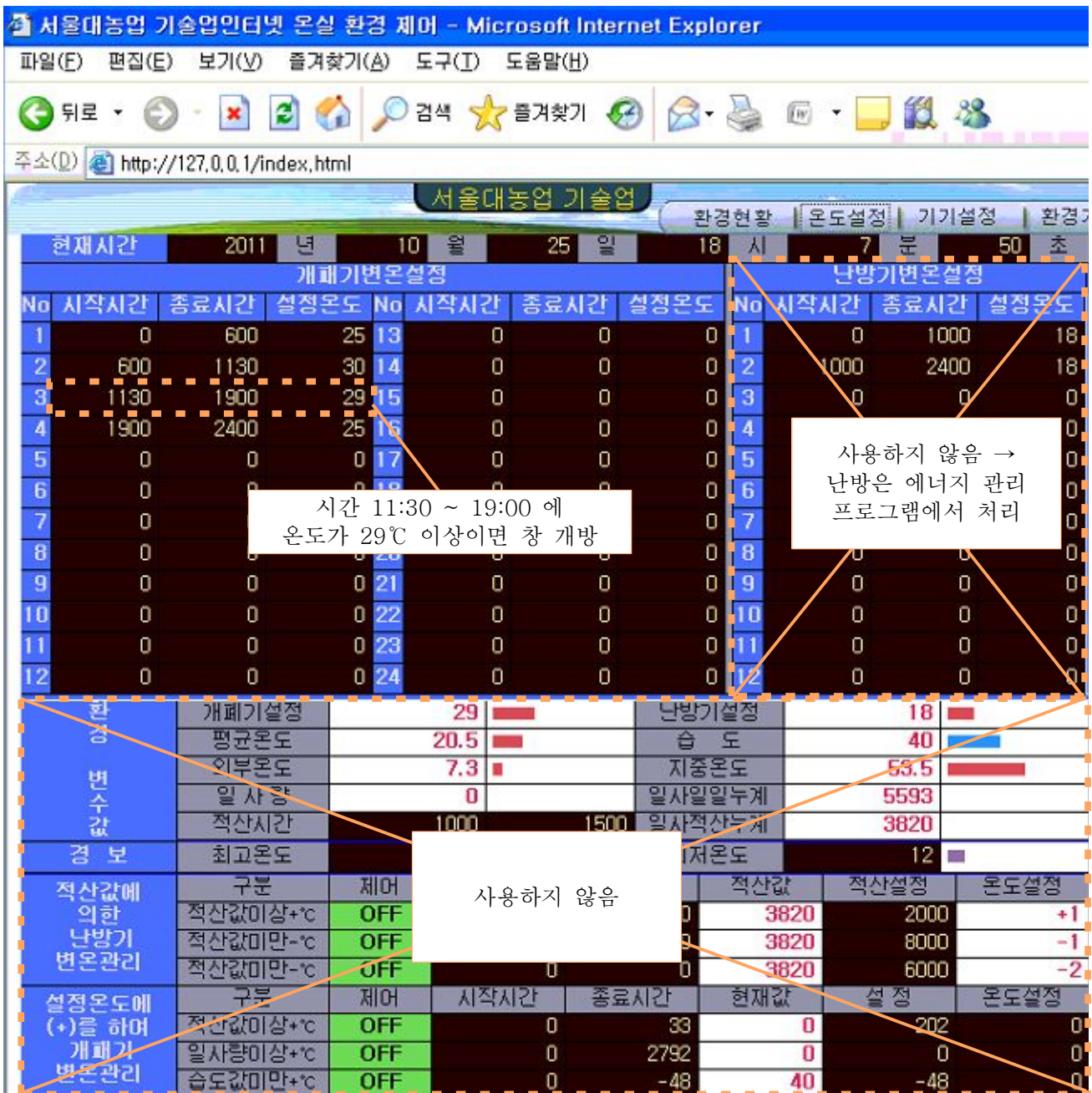


그림 50. 온실 기본 설비 제어를 위한 온도 설정 화면

(3) 에너지 통합 관리 프로그램

에너지 통합 관리 프로그램은 에너지 현황을 실시간 확인할 수 있는 화면, 에너지 사용량 조회 화면, 제어 장치 설정 화면, 카메라 감시 화면, 환경 기록 조회 화면 등으로 구성되어 있고, 추가적인 분석 기능으로 CO₂발생기 운영 상황 조회, 히트펌프 시스템 운영 상황 및 성능 분석, USN 센서 계측값 조회 등이 가능하다.

그림 51은 에너지 현황 화면으로 복합 온실 환경-에너지 관리에서 수행되는 모든 작업을 한

눈에 확인해 볼 수 있는 화면으로 온실의 각종 환경 계측값을 비롯하여, 냉·난방, 탄산가스 발생기 및 히트펌프의 작용 유무, 실시간 열량 변화, 전기사용량 등을 확인할 수 있다.

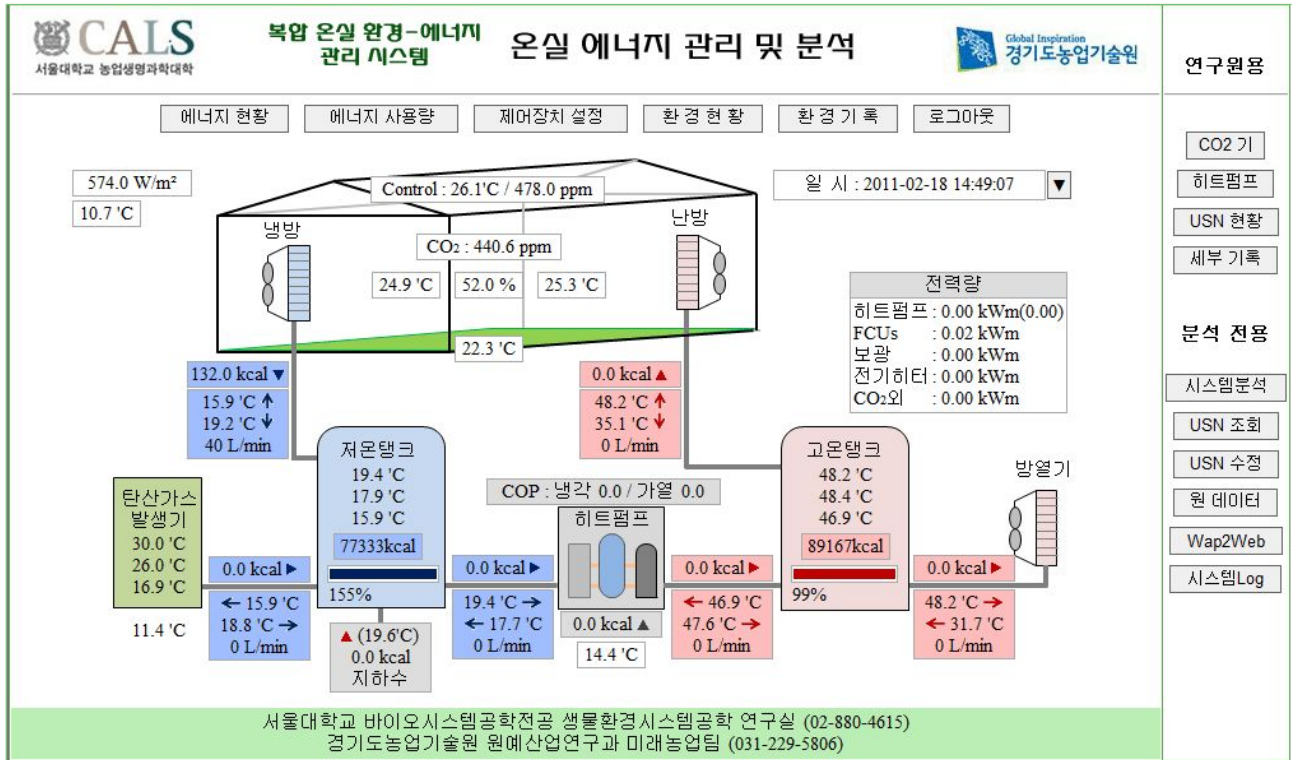


그림 51. 에너지 통합 관리 프로그램 (에너지 현황)

에너지 사용량 화면(그림 52)에서는 전기사용량, 열량, LPG량 등의 에너지 사용량을 실시간으로 확인할 수 있고, 동시에 에너지 사용량을 비용으로 환산하여 보여 준다. 조회는 일별, 시간별로 과거 자료를 조회하여 보여줄 수 있다. Excel 파일로 다운로드 할 수 있는 기능을 구현해 놓았기 때문에 분석된 에너지 사용량 자료를 쉽게 저장할 수 있다.

에너지 사용량		열량 (kcal)		비용 (원)																	
전력량 (kWh)		열회수/공급		전기																	
No.	날짜	히트 펌프	보광	지하수	펌프/팬	기타	합계	LPG	합계	CO2	총비용										
1	2011-02-18 00	0.84	5.64	0.00	0.23	0.02	0.00	0	5781	13	0	30.6	148.3	0.0	8.4	0.7	188.0	0.0	188.0		
2	2011-02-18 01	0.88	5.72	0.00	0.30	0.01	0.00	427	6716	0	0	32.0	150.4	0.0	10.9	0.4	193.8	0.0	193.8		
3	2011-02-18 02	0.94	5.70	0.00	0.26	0.02	0.00	-0	6755	0	0	34.2	149.9	0.0	9.5	0.7	194.3	0.0	194.3		
4	2011-02-18 03	1.02	5.65	0.00	0.31	0.01	0.00	-24	6266	0	0	37.1	148.6	0.0	11.3	0.4	197.4	0.0	197.4		
5	2011-02-18 04	1.62	5.62	0.00	0.35	0.02	0.00	-0	6055	0	0	59.0	147.8	0.0	12.7	0.7	220.2	0.0	220.2		
6	2011-02-18 05	3.16	5.64	0.00	0.36	0.01	0.00	-0	7349	-172	0	115.0	148.3	0.0	13.1	0.4	276.8	0.0	276.8		
7	2011-02-18 06	5.99	0.22	9.65	0.51	0.02	0.00	-0	9967	1	8050	218.0	5.8	351.3	18.6	0.7	594.4	0.0	594.4		
8	2011-02-18 07	2.41	0.00	12.02	0.59	0.16	0.35	-0	11617	1761	10027	87.7	0.0	437.5	21.5	5.8	552.6	668.7	1221.3		
9	2011-02-18 08	5.09	0.00	11.64	0.64	0.33	0.77	-0	13557	5496	9710	185.3	0.0	423.7	23.3	12.0	644.3	1455.5	2099.8		
10	2011-02-18 09	3.87	0.00	11.86	0.23	0.27	0.54	-0	4178	3752	9894	140.9	0.0	431.7	8.4	9.8	590.8	1022.8	1613.5		
11	2011-02-18 10	5.32	0.00	11.86	0.03	0.29	0.56	-0	0	4443	9894	193.6	0.0	431.7	1.1	10.6	637.0	1062.1	1699.1		
12	2011-02-18 11	6.94	0.00	11.95	0.07	0.20	0.37	186	0	3191	9969	252.6	0.0	435.0	2.5	7.3	697.4	708.1	1405.5		
13	2011-02-18 12	5.92	0.00	11.82	1.30	0.02	0.00	10521	0	33	9860	215.5	0.0	430.2	47.3	0.7	693.8	0.0	693.8		
14	2011-02-18 13	7.18	0.00	1.61	1.45	0.01	0.00	11960	0	0	1343	261.4	0.0	58.6	52.8	0.4	373.1	0.0	373.1		
합계		51.18	34.19	82.41	6.63	1.39	2.59	23070	78241	18518	68746	1863.0	899.2	2999.7	241.3	50.6	6053.8	4917.2	10971.0		

그림 52. 에너지 통합 관리 프로그램 (에너지 사용량)

에너지 통합 관리 시스템의 모든 설정은 다음 그림 53의 제어 장치 설정 화면에서 수행할 수 있다.

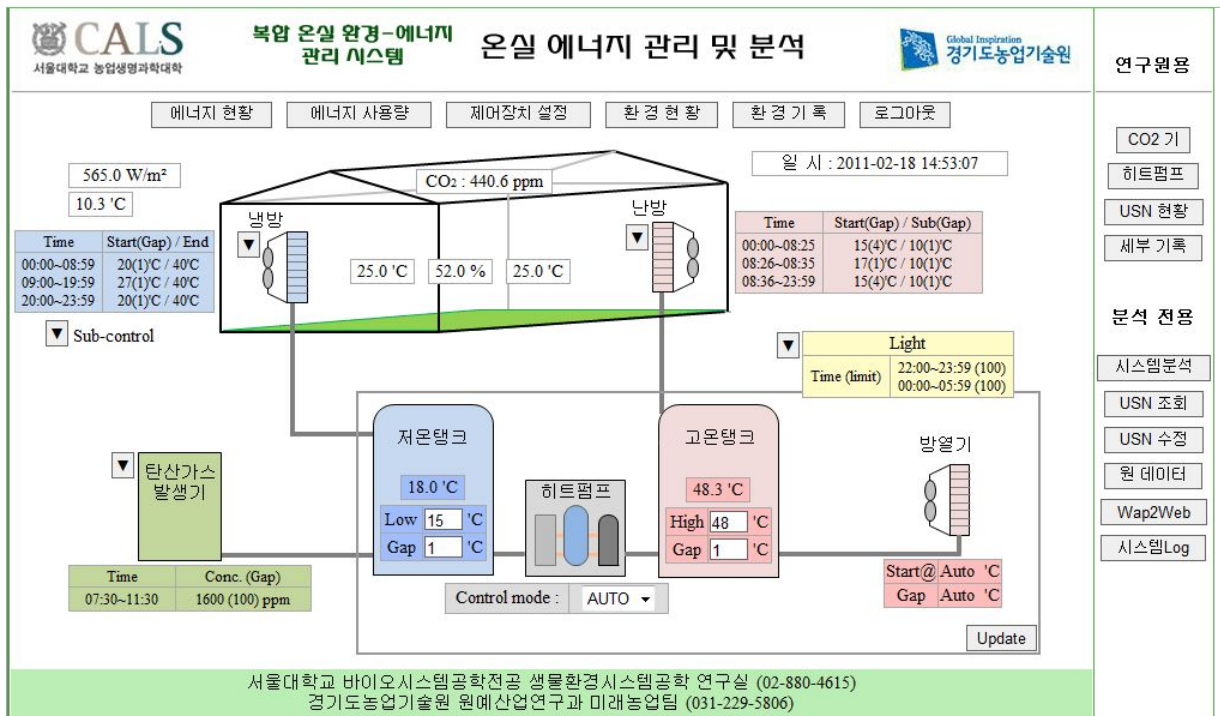


그림 53. 에너지 통합 관리 프로그램 (제어장치 설정)

냉방(열회수)와 난방, 탄산가스 발생기는 각각 4가지 시간 범위에서 다르게 설정할 수 있고, 냉난방은 온도값을, 탄산가스 발생기는 CO₂ 농도값을 설정할 수 있다. 히트펌프의 경우 고온 물탱크와 저온 물탱크의 온도값으로 설정하고, 보광은 시간만을 설정한다.

그림 54의 환경 현황 화면에서는 온실의 내부 화면을 실시간 카메라로 확인이 가능하여 팬, 보광, 차광 스크린, 보온 스크린의 작동 여부를 직접 눈으로 확인할 수 있다.

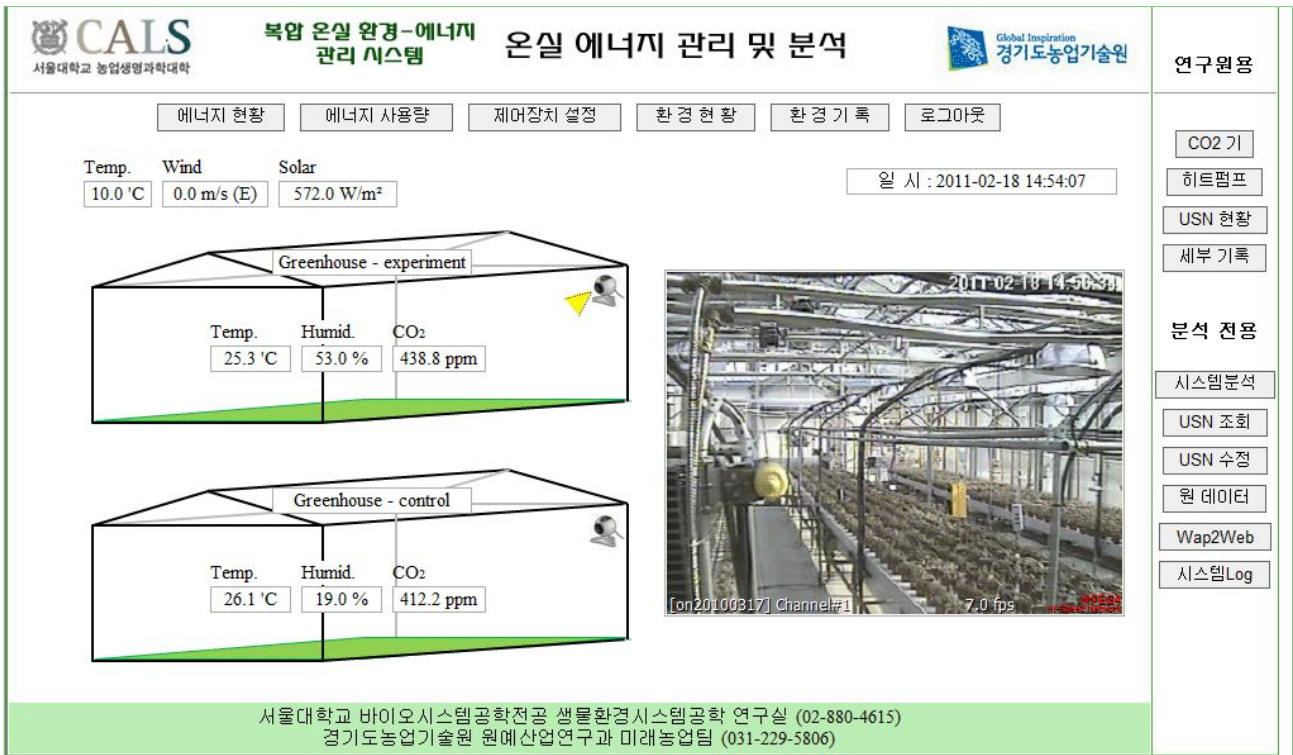


그림 54. 에너지 통합 관리 프로그램 (환경 현황)

환경기록 화면(그림 55)에서는 온실 내부의 온도, 습도, CO₂농도와 외부의 온도, 일사량, 풍향, 풍속을 1분, 10분, 1시간, 1일 간격으로 조회할 수 있다. 따라서 환경 제어 결과를 정확하게 분석할 수 있고, 기록된 환경 데이터를 바탕으로 작물 생육 정보를 획득할 수 있다. 조회된 결과는 Excel 파일로 저장할 수 있기 때문에 추가 분석을 위한 데이터 획득이 용이하다. 또한 원하는 항목을 선택하여 그래프 분석이 가능한데 그 예는 그림 56에 제시하였다.

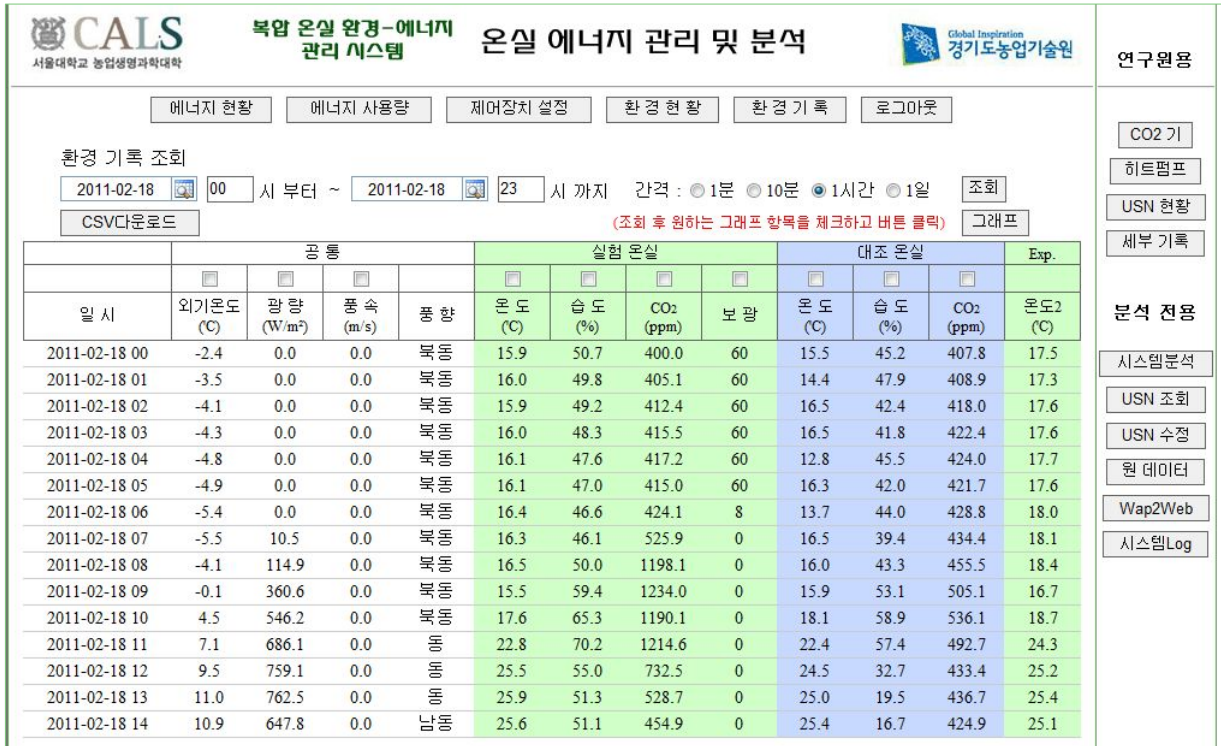


그림 55. 에너지 통합 관리 프로그램 (환경 기록)

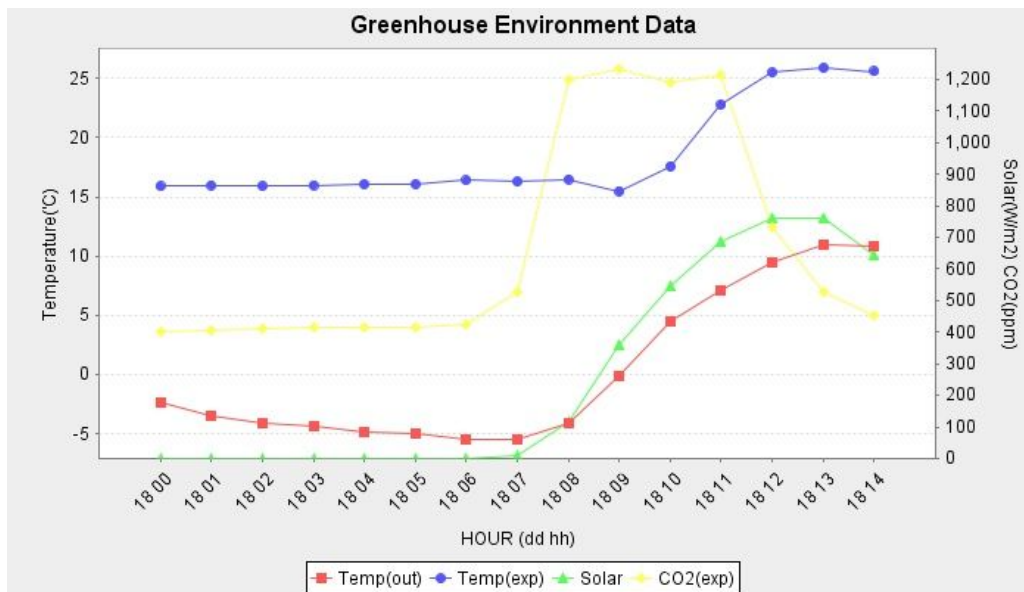


그림 56. 에너지 통합 관리 프로그램 (환경기록 조회 결과의 그래프 출력)

추가적으로 CO₂발생기와 히트펌프 시스템의 작동 결과와 성능 분석을 수행하는 기능을 개발 하였다. 그림 57는 탄산가스 발생기 자체의 성능을 확인해 볼 수 있는 화면으로 1분, 10분, 1시간, 1일 단위로 작동 상태, 각 위치별 온도, LPG 사용량, 회수 열량 등을 확인해 볼 수 있다. LPG 소모량과 회수열량을 계산하면 개발된 CO₂ 발생기의 배기가스 열에너지의 회수율을 산출 할 수 있기 때문에 성능 분석이 가능하다.

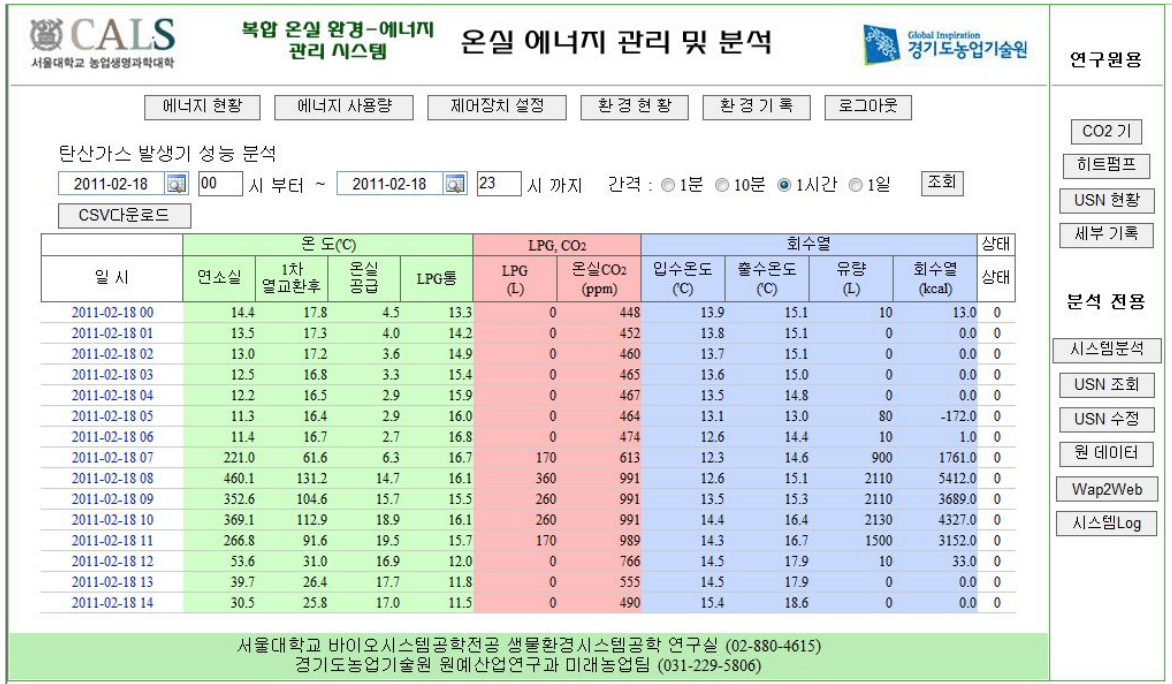


그림 57. 에너지 통합 관리 프로그램 (CO₂ 발생기 성능 분석)

그림 58은 히트펌프 자체의 성능을 확인해 볼 수 있는 화면으로 히트펌프의 부품별(컴프레서, 순환펌프, 방열기) 전기사용량, 이동한 열량, 히트펌프의 성능 계수(COP)를 확인할 수 있다. 히트펌프 시스템의 성능 평가는 3가지로 수행하려고 하였고 이 화면을 통하여 모두 확인이 가능하다. COP의 경우 콤프레서만을 고려한 경우와 전체 시스템을 고려한 경우로 각각 표시하여 히트펌프 운영에 고려할 수 있도록 하였다.

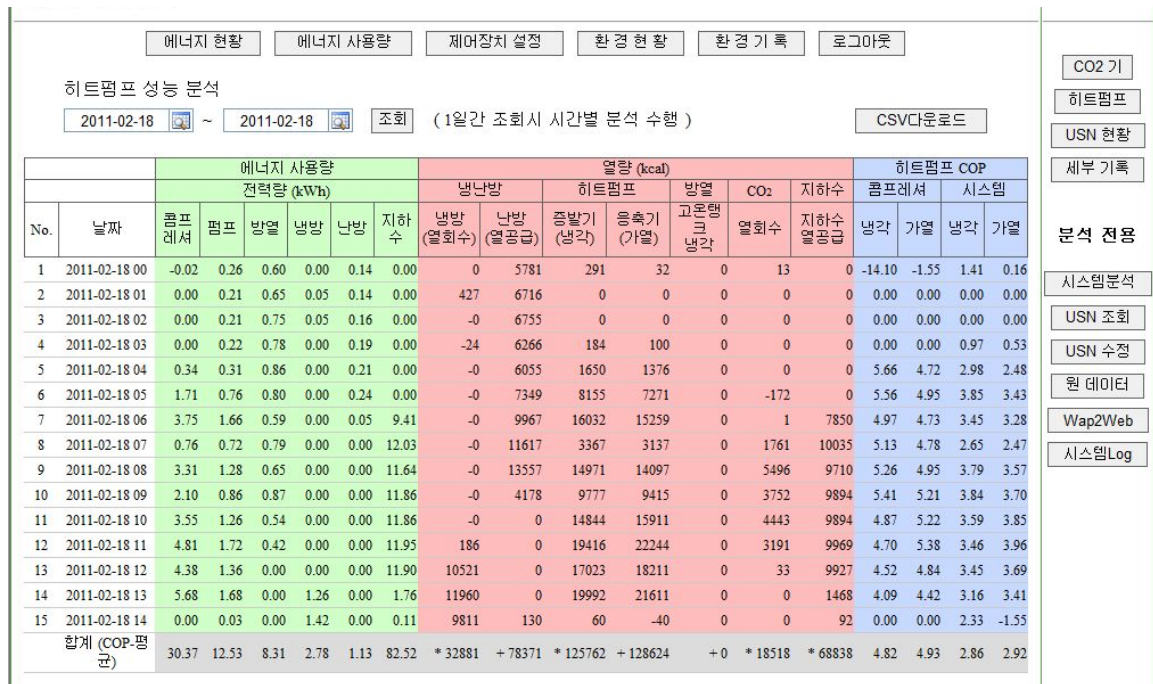


그림 58. 에너지 통합 관리 프로그램 (히트펌프 성능 분석)

(4) 모바일 프로그램

스마트폰에서 에너지 통합 제어 프로그램을 이용할 수 있도록 모바일용 프로그램 개발을 수행하였다. 모바일 프로그램은 크게 6가지 메뉴 (① 온실 환경 현황, ② 에너지 이용현황, ③ 에너지 사용량, ④ 장치 작동 현황, ⑤ 장치 제어, ⑥ 온실 카메라) 로 구성하였다.

그림 59은 ① 온실 환경 현황, ② 에너지 이용현황, ③ 에너지 사용량의 화면을 보여 준다. 온실 환경 현황(그림 59 (a))에서는 현재의 온실 외부 환경(온도, 일사량)과 온실 내부 환경(온도, 습도, CO₂ 농도) 계측값을 보여준다. 에너지 이용현황 화면(그림 59 (b))에서는 히트펌프 시스템과 냉난방, CO₂발생기 운영시 발생하는 열에너지 전달량을 실시간으로 보여준다. 또한 세부 데이터 조회 버튼 클릭시 온도, 유량, 전기 등의 1분 단위 기록 데이터를 조회할 수 있다. 에너지 사용량 화면(그림 59 (c))에서는 당일의 현재까지 에너지 사용량을 시간별로 전기, LPG, 열량으로 나누어 보여주고 지금까지의 비용을 산출해 준다. 또한 과거의 기록도 조회해 볼 수 있다.



(a) 온실 환경 현황 조회

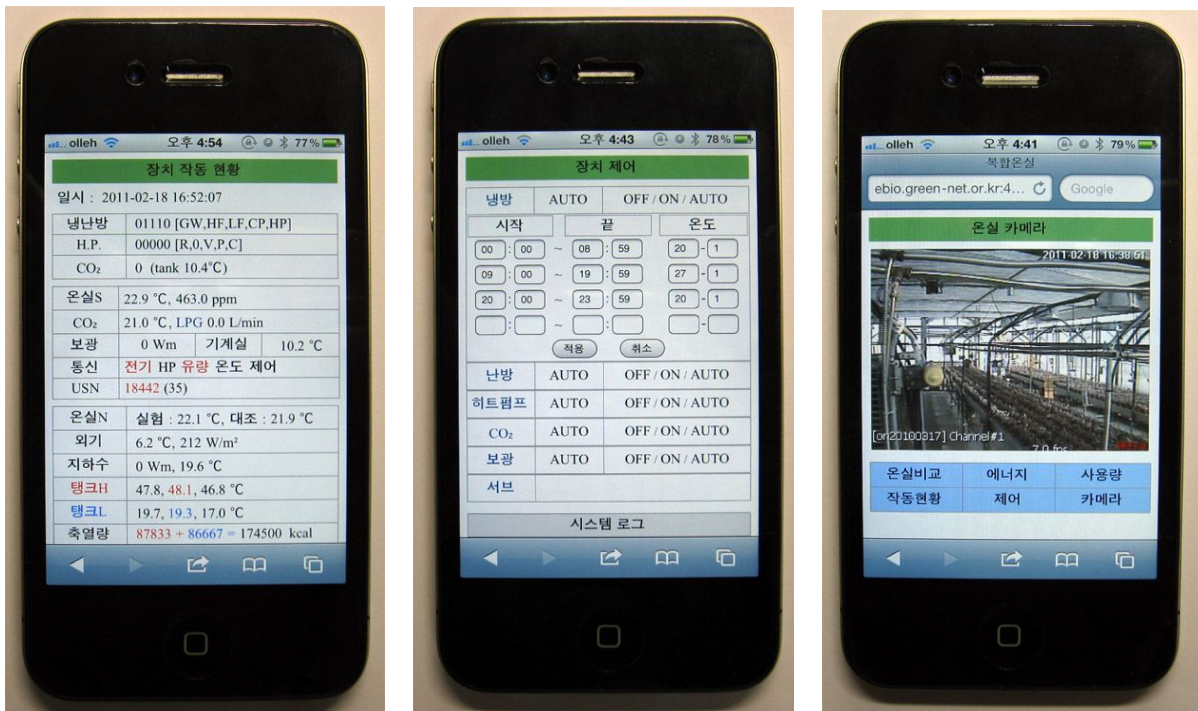
(b) 에너지 이용현황

(c) 에너지 사용량

그림 59. 모바일용 에너지 통합 관리 프로그램 화면 (1)

그림 52는 ④ 장치 작동 현황, ⑤ 장치 제어, ⑥ 온실 카메라 화면을 보여준다. 장치 작동 현

황 화면 (그림 60 (a))에서는 개별 장치들과 통신의 작동 상태를 확인할 수 있고, 기계실, 지하수 등의 기타 환경 조치가 가능하다. 장시간(10분 이상) 작동 상태의 변화가 없는 경우 장치 에러의 가능성이 있기 때문에 빨간색 글씨로 표시하여 경고를 나타내준다. 장치 제어 화면 (그림 52 (b))에서는 에너지 관리 시스템에서 제어하는 모든 요소(냉방, 난방, 히트펌프, CO₂발생기, 보광)의 ON/OFF 및 자동제어 모드 변경 및 설정값 변경이 가능하다. 온실 카메라 화면 (그림 60 (c))은 온실의 현재 상태를 사진으로 보여줌으로써 온실 운영자가 실질적으로 온실 상태를 확인할 수 있도록 하였다.



(a) 장치 작동 현황

(b) 장치 제어

(c) 온실 카메라

그림 60. 모바일용 에너지 통합 관리 프로그램 화면 (2)

마지막으로 추가적인 편의 기능들을 개발하였는데 그림 53에서 보는 것과 같이 스마트 폰의 바탕화면에 아이콘 설치, 그래프 분석, LPG 잔량 확인이 가능하다. 그래프 분석의 경우 (그림 61 (b)) 온도, 습도, CO₂농도, 일사량이 모두 가능하고, LPG 잔량 확인 화면 (그림 61 (c))에서는 지금까지 사용한 LPG량과 남은 LPG량 그리고 앞으로 사용 가능한 예상 일 수 등을 표시해 준다. 따라서 LPG 잔량 확인 화면을 이용하여 LPG 교체시기를 확인하여 LPG 잔량 부족으로 인한 CO₂ 공급 실패 문제를 해결할 수 있다.



(a) 바탕화면 설치



(b) 그래프 분석

날짜 : 2011-02-18

LPG 잔량확인

교체일	2011-02-08
오늘	2011-02-18 (10일 경과)
사용량	13190 L, 26.9 kg
비용	51124 원
잔량	23.1 kg (46.2%)
가능일	약 7 일

온실비교	에너지	사용량
작동현황	제어	카메라

(c) LPG 잔량확인

그림 61. 모바일용 에너지 통합 관리 프로그램 화면 (3)

온실의 이상 운영 상황이 확인되면 스마트폰으로 경보 메시지가 발송된다. 이 때 문제 상황에 대한 상세한 내용이 전달된다 (그림 62).



그림 62. 온실 경보 상황 알림

(5) 에너지 통합 제어 프로그램

제어 수행 명령 여부의 결정은 에너지 통합 제어 프로그램으로 구현되었다. 이 프로그램은 웹(모바일 포함) 프로그램과 서버용 프로그램이 상호 데이터를 주고받으면서 잉여 열에너지를 회수할 것인지, 난방을 공급할 것인지를 결정하고, 히트펌프와 CO₂ 발생기의 작동 여부 또한 이 프로그램에서 최종 결정하게 된다. 에너지 통합 제어 프로그램은 서버 컴퓨터에 백그라운드에서 항상 작동하는 데몬 스레드 (daemon thread)로 구현되었다. 제어 프로그램의 개략적인 흐름은 다음 그림 63와 같다. 복합 온실 환경-에너지 관리 시스템을 통합 운영하면서 세부적인 제어 알고리즘은 개선되어 완성되었고 그 결과는 다음 그림 64 ~ 66와 같다. 빗금 친 처리도 부분은 다른 장치의 정보를 참고하거나 자신의 정보를 다른 장치에게 제공해 주는 부분을 뜻한다. 프로그램이 수행되고 있는 화면은 그림 67과 같고 알고리즘이 구현된 프로그램 코드는 참고자료 1에서 확인할 수 있다.

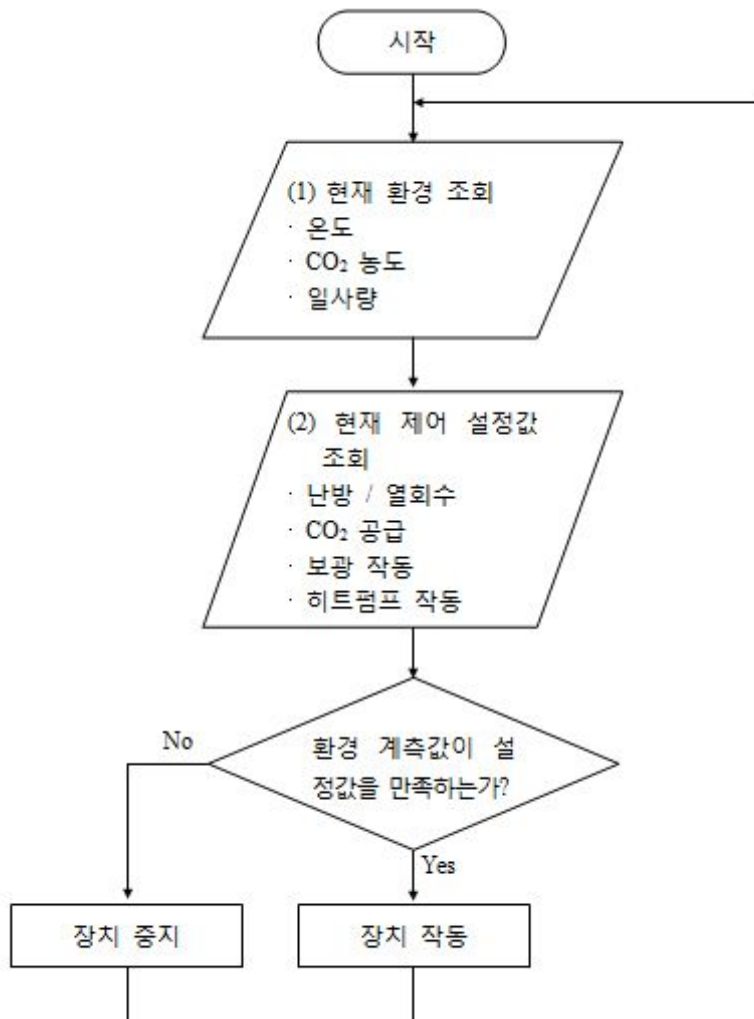


그림 63. 개략적인 제어 알고리즘

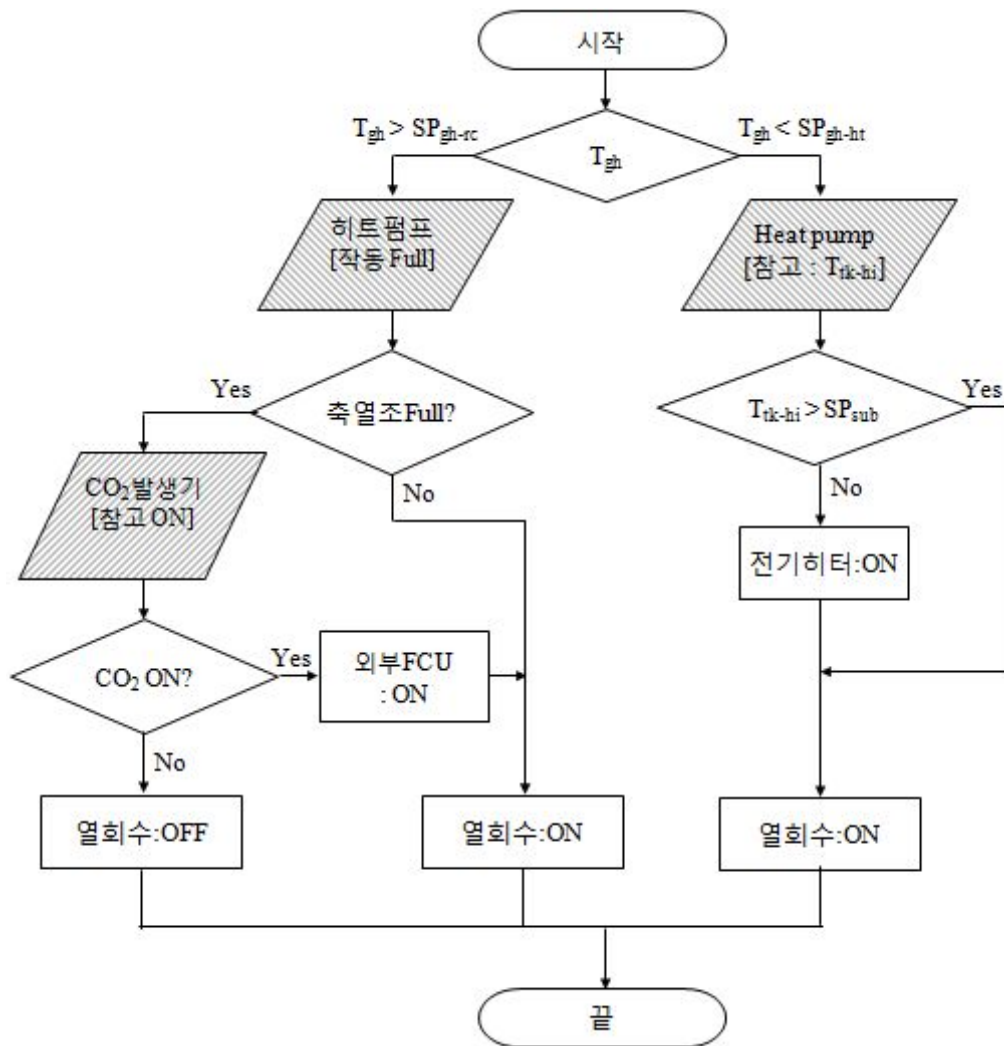


그림 64 열회수 작동 알고리즘
 (T_{gh} 은실온도, SP_{gh-rc} 열회수 온도, SP_{gh-ht} 난방 온도, T_{th-hi} 고온 축열조 온도, SP_{sub} 보조열원 작동온도)

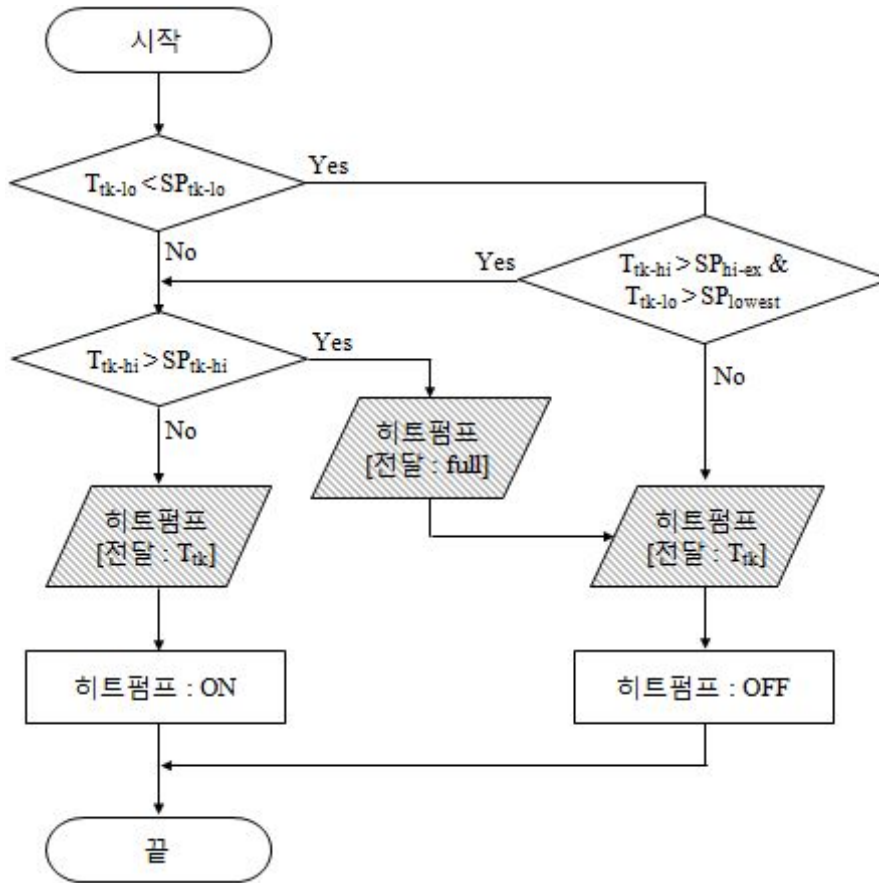


그림 65 히트펌프 작동 알고리즘

(T_{tk-lo} 저온축열조 온도, T_{tk-hi} 고온축열조 온도, SP_{tk-lo} 히트펌프 저온 설정 온도, SP_{tk-hi} 히트펌프 고온 설정 온도, SP_{hi-ex} 저온축열조 추가 작동 온도, SP_{lowest} 저온축열조 최저온도, T_{tk} 축열조 온도)

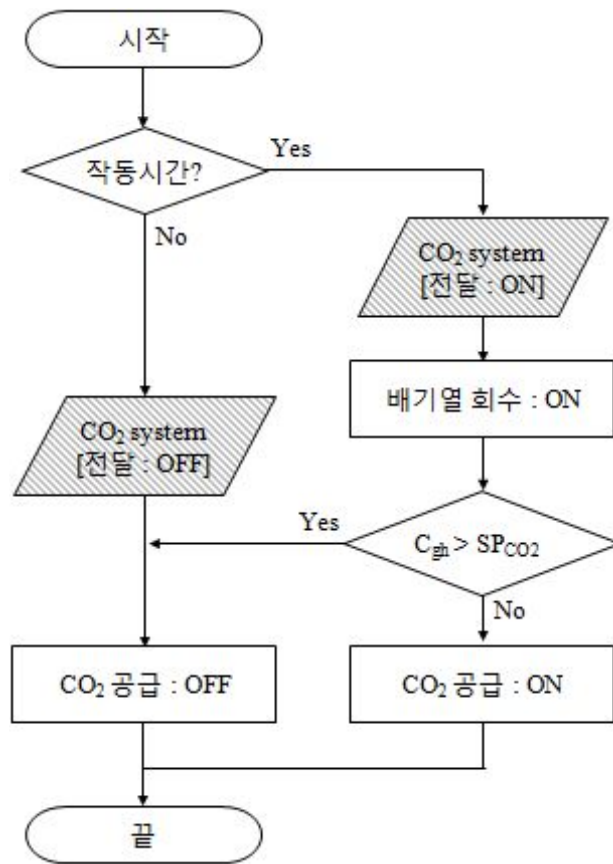


그림 66. CO₂ 발생기 알고리즘
(C_{gh} 온실 CO₂ 농도, SP_{CO2} CO₂ 설정 농도)

```

C:\ greenhouse.bat
Greenhouse/bin/lib/activation.jar;D:/Greenhouse/bin/lib/mailapi.jar;D:/Greenhouse
e/bin/lib/smtp.jar;D:/Greenhouse/bin/lib/dsn.jar;D:/Greenhouse/bin/lib/imap.jar;
. greenhouse
Greenhouse demon started.

*** Environment data ***
2012-02-21 15:49:00.0 >> 22.6/22.3/3.0/599.0/46.0/165.0/21.9/449.0/43.0/0.0
2012-02-21 15:50:00.0 >> 22.5/22.2/2.8/588.0/48.0/162.0/21.9/449.0/43.0/0.0
# 2012-02-21 15:45:12 >> Moved environment data : 2

*** Energy equipment auto control ***
Status(0-OFF, 1-ON, 2-AUTO) : cooling(0) heating(0) co2(0) light(0) hp(0)
# 2012-02-21 15:45:14 >> CO2 is stopped. (2.8 < 10.2)
# 2012-02-21 15:45:14 >> CL:50,1,99 HT:2,1,1,10 CO2:100,10 LT:0 HP:35,3,10,3,99,
10

*** Camera update ***
1329806619640new.jpg
capture_69084.jpg
capture_69085.jpg

*** Error detection ***
# 2012-02-21 15:45:14 >> System Error [통신] 1

```

환경 데이터 획득

제어 결정 및 명령

실시간 온실 사진

제어 오류 감지

그림 67. 에너지 통합 제어 프로그램의 수행 모습

제 4 절 복합 온실 환경-에너지 관리 시스템 설치

1. 실험 온실 설치 계획

개발된 연소열 회수형 CO₂발생기, 하이브리드 히트펌프 시스템, 유비쿼터스 온실통합관리시스템의 통합 성능 평가와 재배 효과 검증을 수행하기 위하여 경기도 농업기술원의 실험 온실(유리온실)에 개별 장치들의 설치 위치를 결정하였다(그림 68). 실험용으로 활용할 온실은 가로 7 m, 세로 15 m, 최고 높이 5m 인 유리온실이고 2동을 이용하여 하나는 실험군, 다른 하나는 대조군으로 선정하였다, 실험군은 본 연구에서 개발한 통합온실환경에너지관리 시스템 운영을 위한 것이고, 대조군은 경유보일러를 이용한 관행 방식의 운영을 위한 것이다. 실험 온실의 실제 모습은 그림 69에서 보는 것과 같다.

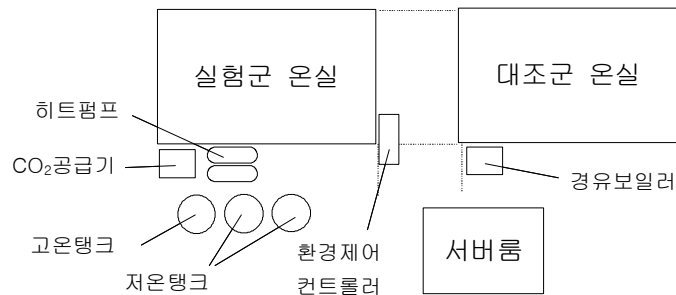


그림 68. 경기도 농업기술원 실험온실의 설치 구조



그림 69. 통합실험 및 재배효과 검증에 활용할 기술원 실험 온실

2. 시스템 구성

복합 온실 환경-에너지 관리를 위한 시스템은 에너지를 회수, 저장, 공급해 줄 수 있는 히트 펌프 시스템 및 온실 냉난방 시스템과 연소열 회수식 이산화탄소 발생기, 보광, 보조열원으로 구성된다. 또한 각각의 장치들을 효율적으로 운영하기 위해서 에너지 관리 시스템과 원격 모니터링 및 제어 시스템이 개발되어 통합되었다. 다음 그림 70은 전체 시스템의 구성을 그림 71은 실물 구성을 보여 주고 있다.

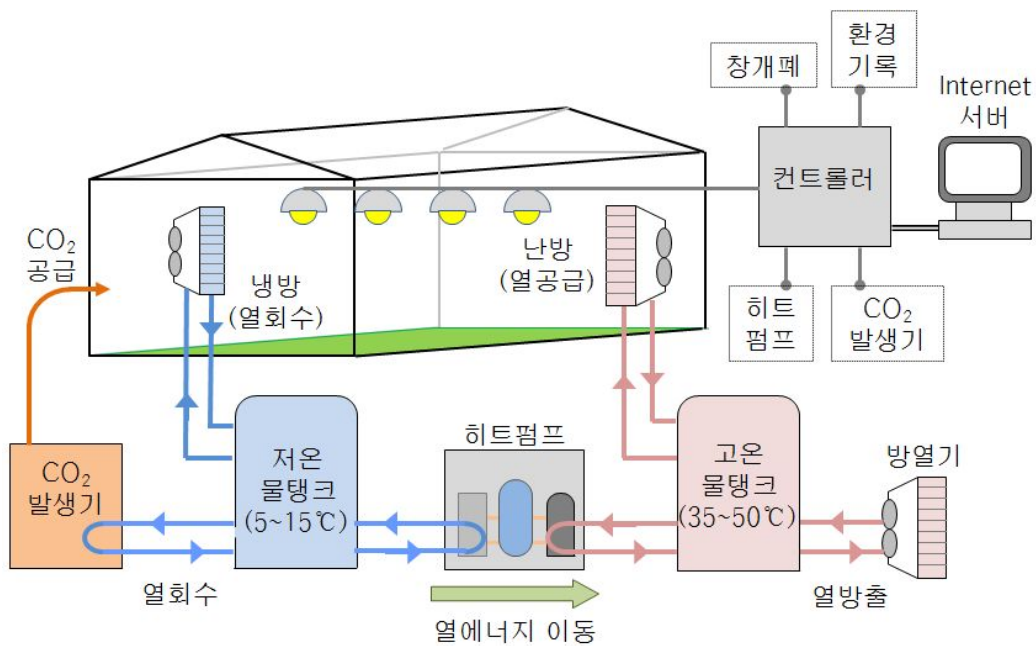


그림 70. 복합 온실 환경-에너지 관리 시스템의 전체 구성



(a) 시스템이 적용된 온실



(b) 시스템이 적용된 기계실

그림 71. 복합 온실 환경-에너지 관리 시스템의 실물 사진

가. 열회수(냉방) 시스템의 구성과 작동 원리

온실의 온도가 작물 생육에 필요한 온도 이상으로 올라가게 되면 열을 회수하게 된다. 열의 회수는 저온 물탱크의 찬물을 온실 안에 설치된 Fan coil unit(FCU)를 통하여 순환시키면서 수행되는데(그림 72) 이 때 온실의 온도는 일정하게 유지되고 저온 물탱크의 수온은 올라가게 된다. 이렇게 회수된 열은 히트펌프를 통하여 고온 물탱크의 온도를 올려주고 저온 물탱크의 온도는 다시 낮아진다(그림 73 (a)). 겨울철의 경우 10 - 15℃로 유지되면서 가능한 높은 온도로 유지하면서 열에너지 저장의 역할을 수행한다. 봄·가을철의 경우 난방에너지 저장 및 탄산가스를 공급해주는 시점에 온실의 창 개방을 방지해 주는 역할을 동시에 수행되는데 10℃수준에서 유지하도록 한다. 여름철의 경우 저온 물탱크는 5 - 10℃ 수준의 온도에서 유지되면 주로 냉방 효과로 이용된다.

이와 같은 처리는 냉방과 같다고 볼 수 있으나 회수된 열을 대기 중으로 버리지 않고 물탱크에 열로 저장하였다가 난방 에너지로 활용할 수 있기 때문에 냉방과는 차별화 된다.



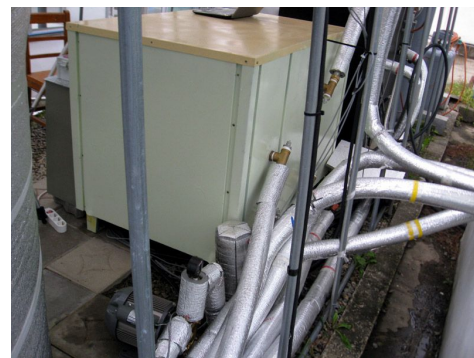
그림 72. 온실의 형태와 FCU 설치 위치
(FCU는 바닥에서 1.5m 위치에 6대, 바닥에서 4 m 위치에 4대, 총 10대가 설치되었다.)

나. 난방 시스템의 구성과 작동 원리

난방의 경우 열회수에 사용되는 온실 내의 FCU를 같이 사용하게 된다. 난방이 필요하게 되면 고온 물탱크에 장착된 순환 물펌프가 작동하고 솔레노이드 밸브가 고온 물탱크의 물을 순환 시키도록 조절된다(그림 73 (c)). 물탱크의 경우 열손실을 방지하기 위하여 그림 73 (a)에서 보여지는 것처럼 단열재로 물탱크를 피복하였다 사용한 피복재는 20 mm 두께의 폴리에틸렌 기포 수지(하나라운 P.E. 시트)를 이용하였고 바닥면을 제외한 모든 부분을 외부와 단열하였다. 바닥면의 경우 물탱크의 안전한 설치를 위하여 본 실험 장치에서는 제외하였지만 실용화 단계에서는 바닥면의 단열도 수행해야한다.



(a) 저온 물탱크(좌 2대), 고온 물탱크(우 1대)와 배관 및 필터



(b) 히트펌프와 연결되는 배관 및 온실 입출 배관 구성



(c) 냉난방용 물펌프 및 솔레노이드 밸브의 구성

그림 73. 냉난방을 위한 물탱크 및 배관 시스템

다. 이산화탄소 발생기의 구성과 작동 원리

본 연구에서 개발된 이산화탄소 발생기는 내부 연소실에서 공연비와 온도조건을 조절하여 완전 연소 조건에 도달한 경우에만 연소 공기(온실 공급용 이산화탄소)를 온실로 공급하고 불완전 연소 조건의 경우 대기중으로 배출된다(그림 74). 개발된 이산화탄소 발생기의 경우 연소

열을 공기열로 온실에 공급하는 것이 아니고 저온 물탱크를 이용하여 회수할 수 있도록 개발되었다. 따라서 이산화탄소 공급을 해주는 오전 시간동안 저온 물탱크의 찬물이 이산화탄소 발생기의 열교환기를 순환하면서 발생된 이산화탄소 온도는 낮춰주고, 저온 물탱크의 온도는 상승하게 된다. 이 때 상승된 온도는 히트펌프를 통하여 고온 물탱크의 온도를 높혀 주고 다시 5 - 15℃의 온도를 유지하게 된다.



(a) 이산화탄소 발생기 외형



(b) LPG유량계 및 냉각수 입출구



(c) 이산화탄소 온실 공급관과 불완전 연소 가스 배출구

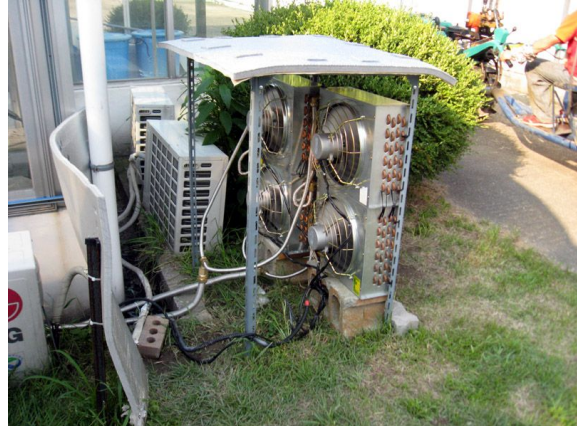
그림 74. 연소열 회수식 CO₂ 발생기의 외형과 설치 구조

라. 히트펌프의 구조 및 운영

히트펌프는 저온 물탱크의 열에너지를 고온 물탱크로 이동시키는 역할을 수행하는데 개별 기기장치의 개발은 1차년도에 수행하였고 2차년도에는 히트펌프 개선 및 온실 시스템과 통합 구성을 하였다. 외관 및 설치위치, 내부 사진은 그림 75와 같다. 저온 물탱크의 경우 5 - 15℃로 운영되고 고온 물탱크는 35 - 50℃로 운영된다. 여름철 뿐만 아니라 봄·가을철에도 회수되는 열에너지가 난방에 필요한 열에너지를 초과하는 경우가 있는데 이럴 경우 고온 물탱크에 저장된 열에너지를 방열기를 통하여 대기 중으로 방출하면서 온실을 저온 운영하기에 적합한 저온 물탱크 온도 조절을 맞춰준다. 제작된 히트펌프는 6 kW급 (7.5RT) 콤프레셔를 활용하고, 응축기와 증발기는 판형 열교환기로 구성하여 수-수 히트펌프를 안정적으로 구성하였다. 또한 저온수와 고온수의 순환을 위해서는 750W급 황동 재질 고압 원심펌프가 이용되었고 순환 유량은 70 - 90 L/min 수준이다. 더 자세한 사항은 성능 평가 부분에 언급하였다.



(a) 히트펌프의 외관 및 설치 위치



(b) 방열기의 외관 및 설치 위치

그림 75. 개발된 히트펌프의 외관 및 내부

마. 보광 설치 현황 및 운영

보광은 250W 고압 나트륨 램프로 총 21대(가로 × 세로 : 3 × 7 대)가 설치되었다. 보광은 ON/OFF 시간 설정으로 운영되는데 야간에 점등되는 보광은 난방 부하 절감에 효과가 있다. 작동 사진은 그림 76과 같다.



(a) 보광의 작동 사진

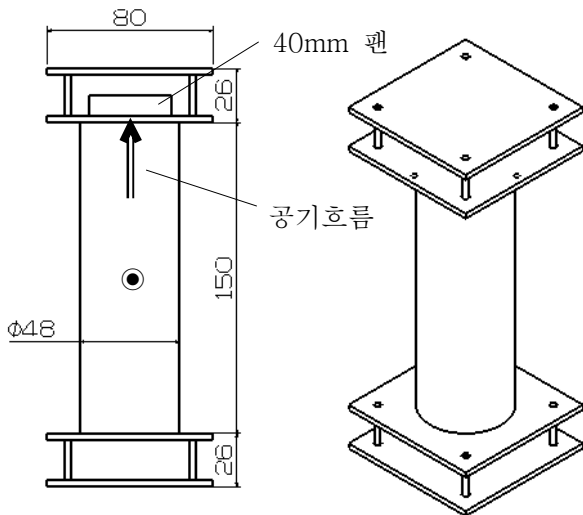


(b) 안정기 설치 위치 및 구조

그림 76. 보광 설치 및 작동 사진

3. 정확한 건구 온도 계측을 위한 강제 송풍식 복사열 차단 장치 적용

에너지 관리를 위해서 중요한 요소 중 하나가 정확한 온도의 측정이라고 할 수 있는데 태양 광 복사에 의한 온도 계측 오차를 효과적으로 막아 줄 수 있는 강제 송풍식 복사열 차단 장치에 대한 연구가 1차년도에 수행되었고(제2절 2. 참고) 실제 온실 온도 계측에 그 결과를 활용하였다. 온실에 활용한 강제 송풍식 복사열 차단 장치의 모습은 그림 77과 같다. 강제 송풍식 복사열 차단 장치는 지름 48 mm의 PVC 통에 알루미늄 필름을 붙이고 한 쪽 출구에 40 mm 팬을 장착하여 공기를 PVC통 밖으로 빼내는 구조이다. 이 때 온도센서는 PVC 통 중앙에 위치하게 하여 복사열에 의한 온도 계측 오차를 완전히 차단한다. 이와 같은 온도 계측은 온실 내부, 외부 온도 계측에 모두 적용하였다.



(a) 설계도 및 치수



(b) 온실 설치 사진

그림 77. 강제 송풍식 복사열 차단 장치 (● : 온도 센서의 위치)

4. 복합 온실 환경-에너지 관리 시스템의 성능평가 측정 장치 설치

가. 개별 센서 및 계측기의 사양

에너지 통합관리 시스템의 환경 및 에너지 요소 계측을 위해 사용된 센서의 사양과 외형은 다음 표 22와 같다. 센서는 환경 계측용과 에너지 제어용으로 나뉘지는데 각각 그림 78와 79에 그 형태를 제시하였다.

표 22. 에너지 통합관리 시스템에 사용된 센서들 (사양)

번호	센서종류	모델 / 형태	용도	제조사
1	온도	PT-100Ω	온실 내외부 온도 계측	-
2	온도	NTC-10kΩ	입출수 온도, 기계실 온도	-
3	일사량	SYE-420M2007PM4	온실 외부 일사량 측정	신영전자
4	물유량	접선류 익차형 최대유량(m ³ /hour) : 2, 2.5, 5	온실냉난방, 히트펌프 시스템의 유량 측정	신일미터텍
5	가스량(LPG)	2.4 m ³ /hour (10L 단위 계측)	탄산가스 발생기 LPG 사용량 측정	신일미터텍
6	전력량	OMWH-121(단상) OMWH-344(3상)	히트펌프, 보광, 보조열원, 냉난방, CO ₂ 기, 기타 전력량 계측	옵니시스템
7	습도	VT-250-TH (0 - 100%)	온실 내부 습도 계측	소하테크
8	CO ₂	SH-VT250 / NDIR 방식	온실 내부 CO ₂ 농도 계측	소하테크
9	강우	통전방식	강우, 강설시 비상 천장 개폐	해밀기연
10	풍향, 풍속	Weather Wizard III	온실 외부 풍향, 풍속 계측	Davis



(a) CO₂센서



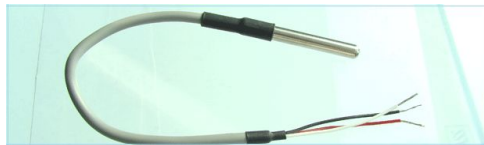
(b) 강우센서



(c) 풍향풍속센서



(d) 일사량센서



(e) 온도센서

그림 78. 환경 계측용 센서



(a) 유량계



(b) CO₂센서



(c) LPG유량계



(d) 전력량계



(d) 온도센서

그림 79. 에너지 제어용 계측기 및 센서

나. 센서 및 계측기의 설치

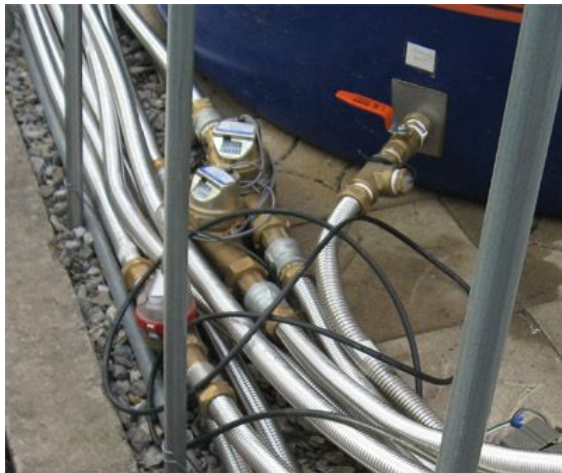
선정한 센서 및 계측기를 주요 포인트에 설치하였다. 히트펌프의 성능을 평가하기 위한 온도 측정(4포인트), 온실의 난방 및 잉여열 회수 성능을 평가하기 위한 온도 측정(4포인트), CO₂ 발생기의 열회수 성능 평가를 위한 온도 측정(2포인트)을 위해 총 10개의 온도 포인트를 설정하고 그 외의 이용되는 에너지 사용량을 기록하기 위한 측정기(물-4포인트, 가스-1포인트, 전기-6포인트)들이 설치되었다. 설치된 위치와 형태를 보여주는 사진은 다음 그림 80와 같다.



(a) 전력량계 (485통신 출력)



(b) 온도계 (4~50mA 출력)



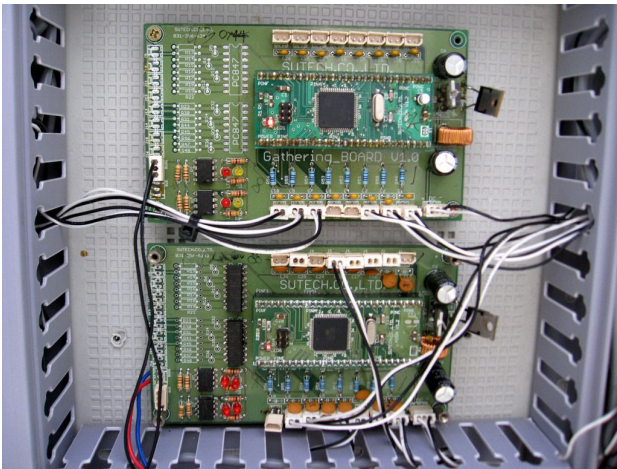
(c) 물 유량계 (펄스 출력, 1pulse/L)



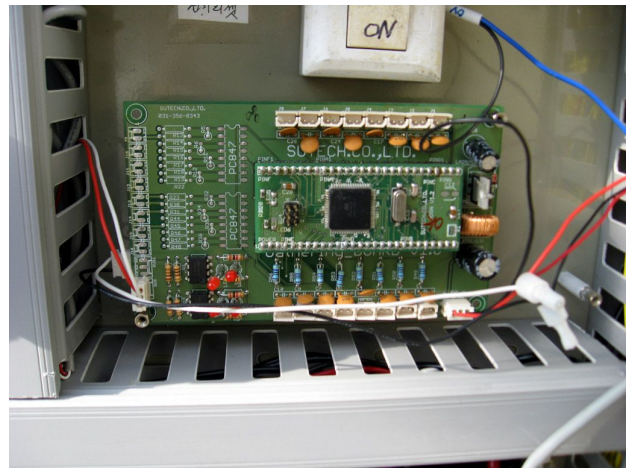
(d) 가스 유량계 (펄스 출력, 1pulse/10L)

그림 80. 주요 계측 포인트와 계측 장치

계측된 아날로그값(온도, 유량)과 디지털값(전력량)은 계측 전용 보드를 제작하여 에너지 통합 제어 장치(제 5 절 참고)와 RS485통신으로 연결하였다. 제작된 계측 전용 보드의 사진은 다음 그림 81과 같다.



(a) 온도-유량용 보드 (아날로그 센서용)



(b) 전력량용 보드 (디지털 센서용)

그림 81. 계측값 측정 및 전송 보드

우선 무선 온습도 센서 36개를 실험온실(32개) 대조온실(4개)에 각각 천장부 및 식물 생장부의 높이에 설치하여 온실 내부의 온습도 환경을 모니터링할 수 있도록 하였다(그림 83). 각 온습도 데이터는 10분마다 수집되고 이 데이터를 이용하여 온실의 에너지 흐름, 손실을 분석할 수 있고, 시간별, 계절별 온실의 온도 분포 특성을 정확하게 분석할 수 있다. 무선 온습도 센서 장착 사진은 그림 82에서 보는 바와 같다.

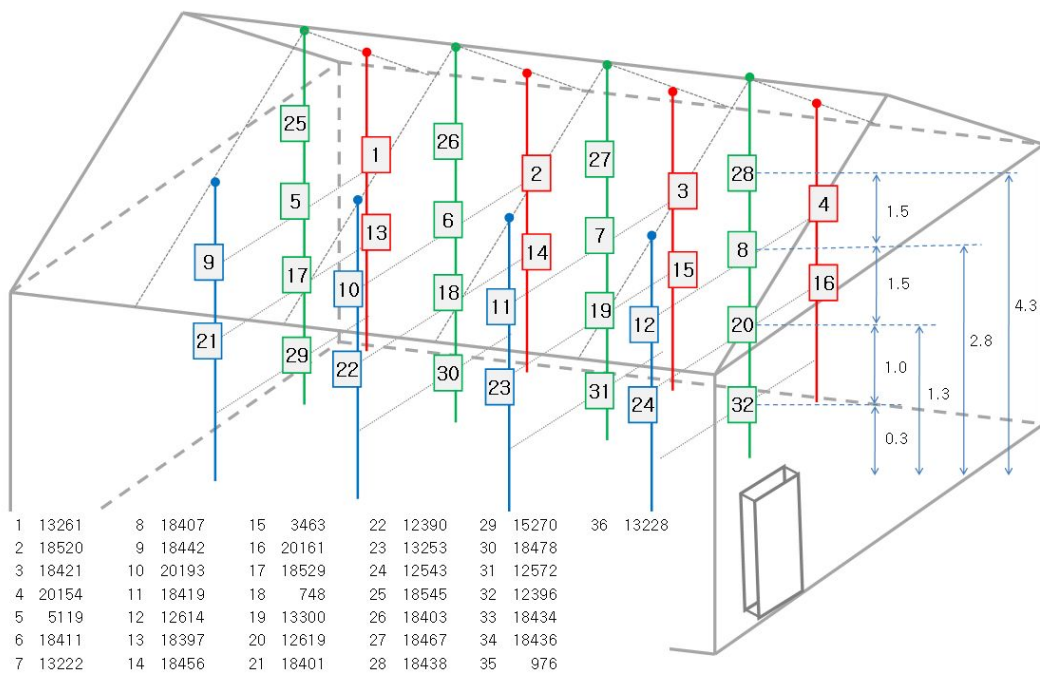


그림 82. 무선 온습도 센서의 위치



그림 83. 무선 온습도 센서 장착 사진

5. 에너지 통합 관리 시스템의 문제점 파악 및 개선

복합 온실 환경-에너지 관리 시스템의 설비가 완료된 이후 5월 - 9월간 전반적인 성능 개선 및 부품 교환이 이루어졌고, 10월 - 2월간에도 지속적인 문제점 파악 및 개선작업이 수행되었다. 수행된 작업들은 장치별 기간별로 나누어 표와 그림으로 정리하였다. 본 절의 내용은 전체 연구기간 중 발견된 문제점들을 제시하고 개선된 사항을 설명하는 것이다. 따라서 이미 언급한 시스템 설치 사항과 중복된 그림과 설명이 있을 수 있음을 미리 명시한다.

표 23. 하이브리드 히트펌프 시스템의 문제점 및 개선 사항

발생 시기	문 제 점	개선 사항
2010년 5월	증발기 용량 부족으로 인한 저온수 냉동 문제 발생	응축기측 압력 조절
2010년 5월	증발기 선정 실패 및 저온수, 고온수 유량 부족으로 인한 성능 계수(COP)가 2 이하로 운영됨	히트펌프용 순환 물펌프 용량 증가
2010년 6월	컴프레셔 진동에 의한 배전판의 마그네트 접촉불량 발생	히트펌프의 배전판을 본체와 분리함
2010년 6월	너무 풍부한 잉여 열에너지로 인하여 고온수 탱크의 온도가 최대로 올라서 히트펌프가 더 이상 작동 하지 않는 문제 발생	고온수 탱크를 식혀 줄 수 있는 방열기 설치 (그림 80)
2010년 6월	공급 받은 물의 부유물로 인한 열교환기 부식 및 막힘 현상 발생 (경기도 농업기술원에서 공급하는 물이 수도물이 아니고 지하수 인 것으로 확인됨)	1차적으로 필터(50 mesh)를 장착 : 히트펌프 응축기 방향, 증발기 방향, 온실 냉방수 입력 방향, 난방수 입력 방향, 방열기 방향, 총 5포인트(그림 81)
2010년 7월	온실 안 FCU에서 냉방시 응축수 발생(그림 82 (a))	응축수 처리 받침 설치(그림 82 (b))
2010년 8월	알루미늄 재질의 방열기가 지하수 부식문제로 인하여 성능 저하 및 막힘 현상 증가(그림 83)	1차 필터 처리에 이어 2차적으로 FCU를 구리 재질로 교체함(그림 84)
2010년 11월	히트펌프의 컴프레셔와 응축기, 증발기의 용량 부조화의 원인으로 컴프레셔 최종 고장	안정성이 향상된 새로운 히트펌프 제작 : 판형 열교환기로 응축기, 증발기 구성. 기액분리기 장착. 압력계 및 압력 스위치를 디지털로 교체 (그림 85)



그림 84. 고온수 탱크 냉각용 방열기

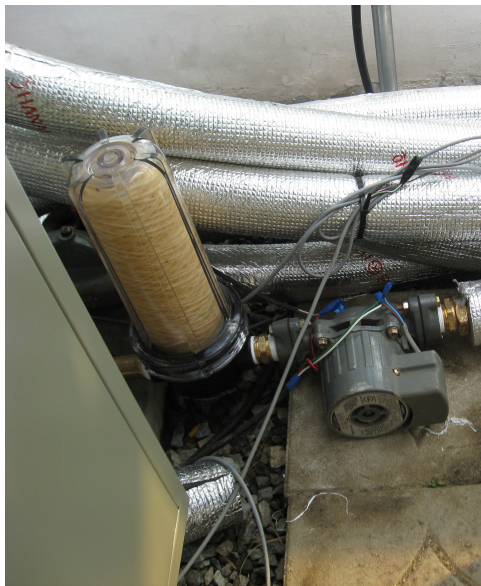


그림 85. 필터 장착 (물탱크의 모든 배출구 위치)



(a) 냉방시 FCU 응축수 발생

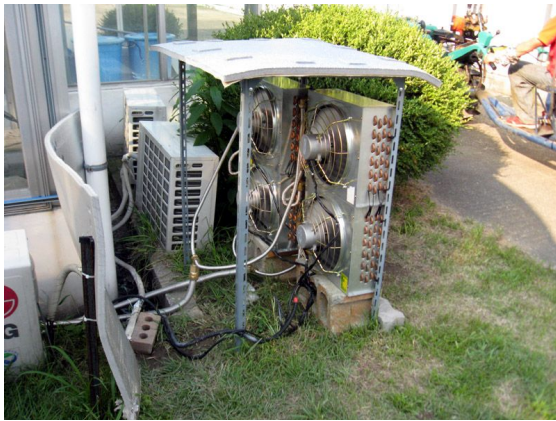


(b) FCU 응축수 받침 설치

그림 86. FCU 응축수 발생 문제 및 응축수 받침 처리



그림 87. 알루미늄 FCU의 지하수 부식 문제 발생



(a) 고온수 탱크 방열용 FCU



(b) 온실 내부 냉·난방용 FCU

그림 88. 시스템에 사용된 모든 FCU를 알루미늄에서 구리 재질로 변경



그림 89. 개선된 히트펌프의 제작

표 24. 탄산가스 발생기의 문제점 및 개선 사항

발생 시기	문 제 점	개 선 사 항
2010년 10월	저온으로 인한 LPG 기화열 부족. 탄산가스 발생기의 버너가 수시로 에러 발생	LPG통을 보온하고 열선 처리하고 LPG통 온도에 따라 자동으로 가온처리 (그림 86)
2011년 1월	LPG 교체 시기를 확인하지 못하여 탄산가스 공급이 중단되는 문제 발생	LPG 사용 유량을 무게로 환산하여 모바일 프로그램에서 LPG 잔량 확인이 가능하도록 개발



그림 90. LPG통 가온을 위한 열선 및 단열 처리

표 25 냉난방 장치의 문제점 및 개선 사항

발생 시기	문 제 점	개 선 사항
2010년 12월	보온 스크린이 열리는 8시30분에 저온 충격 발생. 16℃에서 13℃까지 떨어짐	보온 스크린 개방 10분 전에 온실의 난방 설정온도를 2℃ 상승시켜줌
2011년 1월	주간 기온이 계속 영하이고, 야간 기온이 영하 10도 이하인 날이 지속되면서 잉여열 회수가 되지 않고, 냉방 파이프 라인이 얼음(그림 82)	냉방 파이프를 녹여서 정상화를 시키고, 매일 오후 4:50 경 약 3분간 강제 냉방을 가동하여 냉동 문제 해결



그림 91. 저온수 파이프 배관과 필터의 물이 어는 문제 발생

표 26 에너지 통합 제어 장치의 문제점 및 개선 사항

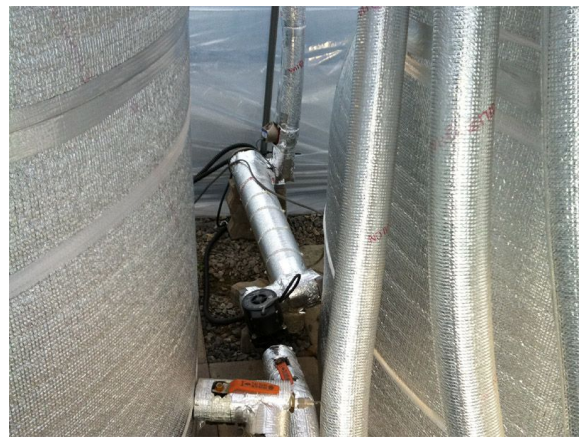
발생 시기	문 제 점	개 선 사항
2010년 12월 - 2011년 1월	간헐적인 메인 컨트롤러 오작동 문제 발생.	<ul style="list-style-type: none"> • 통신선 교체 및 단열 • 380V 3상 이용 장비의 선로별 전류량을 균일하게 조절함 • 환경 계측 장비를 통한 원격 전원 reset 기능 추가 • 저온에 대비한 통신선 보온 피복

표 27. 보조 열원의 문제점 및 개선 사항

발생 시기	문 제 점	개 선 사 항
2010년 12월	<p>온실의 온도가 특정 온도 이하로 떨어질 경우 작동하는 보조 열원(전기히터)의 운영 방식이 온실 난방에 도움이 안됨 => 용량이 적고, 큰 용량을 장착할 경우 순간 전력사용량이 너무 커지는 문제가 있음</p>	<p>저온수 탱크 쪽에 가상 지하수 구현 => 5kW였던 전기히터를 12kW로 올리고 저온수 탱크를 순환하여 열량 보충. 특히 낮시간에도 계속 작동하면서 열량 보충이 가능함 (그림 88)</p>



(a) 교체전 : 기존의 온실 배드 아래 난방수 전기히터 (5 kW)



(b) 교체후 : 저온수 탱크 가열용 전기히터 (12 kW)

그림 92. 보조 열원을 난방수 가열에서 저온수 탱크 가열로 변경

제 5 절 시스템 성능 평가

1. 히트펌프 시스템

가. 성능 평가 방법

히트펌프의 성능을 나타내는 방법 중 하나는 성능계수(Coefficient of performance, COP)를 이용하는 것이다. 히트펌프의 성능계수는 조금씩 다른 여러 가지 정의로 규정되고 있는데 ①컴프레서를 작동하는데 소요된 에너지와 응축기에서의 열전달 비율 ②히트펌프를 작동하는데 필요한 일량과 고온 저장소에 전달된 열량 비율 등이 대표적이다(Black and Hartley, 1996). 첫 번째 정의는 열역학 측면에서의 이론적인 수치라고 하면 두 번째 정의는 좀더 실용적인 수치라고 할 수 있다. 또한 히트펌프를 난방과 냉방으로 동시에 활용할 경우, 난방 성능계수와 냉방 성능계수를 따로 산출하게 되는데 그 식은 식 (6)과 식 (7)로 표현된다(ASHRAE, 2005).

$$\text{Cooling COP}(\beta_R) = \frac{\text{Useful cooling effect}}{\text{Net energy supplied from external sources}} \quad (6)$$

$$\text{Heating COP}(\beta_H) = \frac{\text{Useful heating effect}}{\text{Net energy supplied from external sources}} \quad (7)$$

본 연구에서는 난방용 히트펌프의 성능은 히트펌프의 응축기를 통과하는 고온탱크 물의 유량과 온도 변화를 통하여 확인할 수 있고, 냉방용 히트펌프의 성능은 히트펌프의 증발기를 통과하는 저온탱크 물의 유량과 온도 변화를 통하여 확인할 수 있다. 필요한 온도 및 유량값은 온도센서 및 물 유량계를 이용하여 측정한다. 따라서 산출할 난방 성능계수와 냉방 성능계수는 다음의 Eq. 3과 Eq. 4로 계산된다.

$$\text{COP for cooling} = - \frac{\rho_{wt} c_{wt} Q (T_{evap-out} - T_{evap-in})}{E_{comp}} \quad (8)$$

$$\text{COP for heating} = - \frac{\rho_{wt} c_{wt} Q (T_{evap-out} - T_{evap-in})}{E_{comp}} \quad (9)$$

ρ_{wt} : 물의 밀도 (kg/m^3)

c_{wt} : 물의 비열 (kcal/kg)

- Q_{wt} : 물 유량 (m^3/sec)
 $T_{cond-out}$: 응축기 배출수 온도 ($^{\circ}C$)
 $T_{cond-in}$: 응축기 투입수 온도 ($^{\circ}C$)
 $T_{evap-out}$: 증발기 배출수 온도 ($^{\circ}C$)
 $T_{evap-in}$: 증발기 투입수 온도 ($^{\circ}C$)
 E_{comp} : 압축기의 전기소모량 (kWh)

하지만 위의 값은 $T_{cond-in}$, $T_{evap-in}$ 의 온도에 따라 변경된다. 다시 말해서 본 연구에 활용하는 히트펌프 시스템의 성능계수는 저온탱크와 고온탱크의 온도에 영향을 받는다. 따라서 평균 성능계수는 초기 탱크의 온도에서 목표 탱크의 온도에 도달하는 동안의 에너지 공급량과 소비량의 개념으로 계산식의 변경이 필요하다. 시간 개념을 포함한 평균 성능계수의 식은 다음 Eq. 5 와 Eq. 6과 같이 표현해 볼 수 있다.

$$\text{Mean COP for cooling} = - \frac{\int_0^{t_{fnl}} \rho_{wt} c_{wt} Q [T_{evap-out}(t) - T_{evap-in}(t)] dt}{E_{comp} t_{fnl}} \quad (10)$$

$$\text{Mean COP for heating} = \frac{\int_0^{t_{fnl}} \rho_{wt} c_{wt} Q [T_{cond-out}(t) - T_{cond-in}(t)] dt}{E_{comp} t_{fnl}} \quad (11)$$

t_{fnl} : 축열조 목표 온도에 도달하는 시간

본 연구에서 제시한 평균 성능계수의 경우 고온탱크와 저온탱크의 물을 순환하는데 필요한 펌프의 에너지 소모량은 고려하지 않은 값이다. 따라서 본 연구에서 사용한 히트펌프 시스템의 실질적인 평균 성능계수는 다음의 식 (12)와 식 (13)으로 완성될 수 있다. 또한 식 (12)와 식 (13)의 경우 소모 에너지량에 대한 발생 에너지로 볼 수 있기 때문에 에너지 효율로도 이해될 수 있다.

$$\text{Actual Mean COP for cooling} = - \frac{\int_0^{t_{fnl}} \rho_{wt} c_{wt} Q [T_{evap-out}(t) - T_{evap-in}(t)] dt}{(E_{comp} + E_{pump-evap} + E_{pump-cond}) t_{fnl}} \quad (12)$$

$$Actual\ Mean\ COP\ for\ heating = \frac{\int_0^{t_{fnl}} \rho_{wt} c_{wt} Q [T_{cond-out}(t) - T_{cond-in}(t)] dt}{(E_{comp} + E_{pump-evap} + E_{pump-cond}) t_{fnl}} \quad (13)$$

$E_{pump-evap}$: 증발부 순환펌프 전력소모량

$E_{pump-cond}$: 응축부 순환펌프 전력소모량

나. 성능 평가 결과

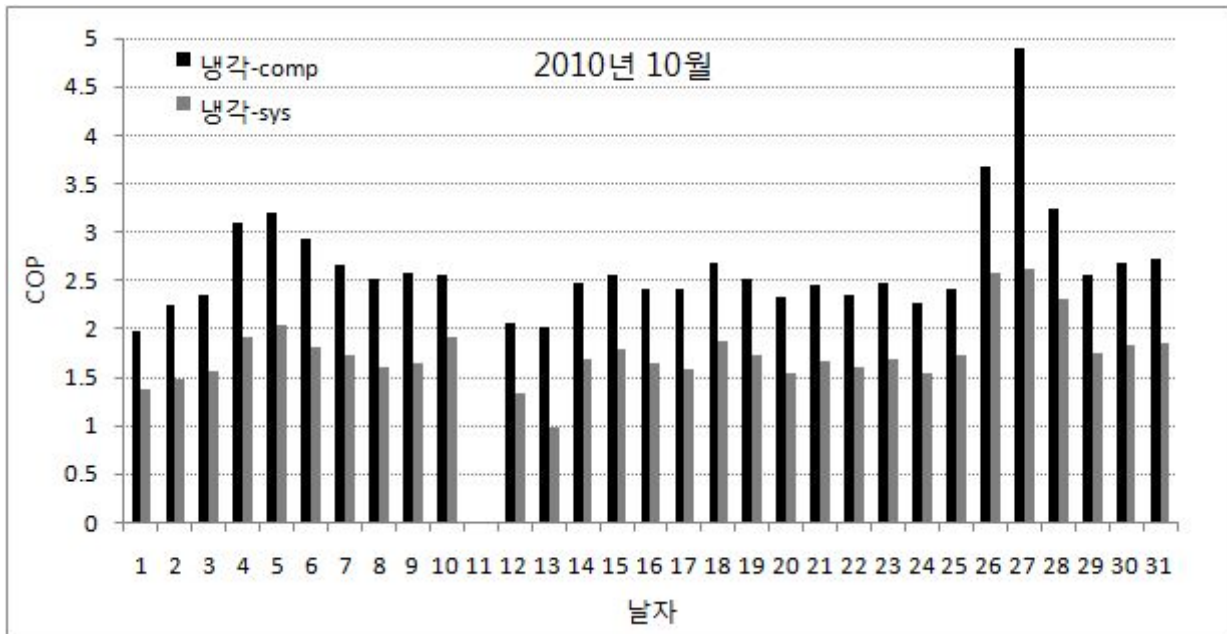
본 연구에서 개발한 히트펌프는 4월에 1차, 8월에 2차 개발이 되었는데 1차 개발된 히트펌프의 경우 부품간의 부조화 문제로 성능이 낮게 측정되었고 이에 대한 원인과 결과는 제 3 절 1.에 언급하였다. 여기에서는 2차 개발된 히트펌프의 성능평가에 중점을 두고 그 결과만을 제시하였다.

성능평가는 콤프레셔의 소요 동력과 응축기, 증발기 측에서 발생하는 열량 전달 비율이 아닌 물탱크를 중심으로 히트펌프로 들어가는 물의 열량과 히트펌프에서 돌아오는 열량으로 평가하였다. 따라서 위 방정식중 콤프레셔만을 고려한 Eq. 5, Eq. 6으로 산출하고 펌프 동력까지 포함한 성능을 Eq. 7, Eq. 8을 통하여 산출하였다. 성능평가 기간은 2010년 10월부터 2011년 2월까지 약 5개월이다.

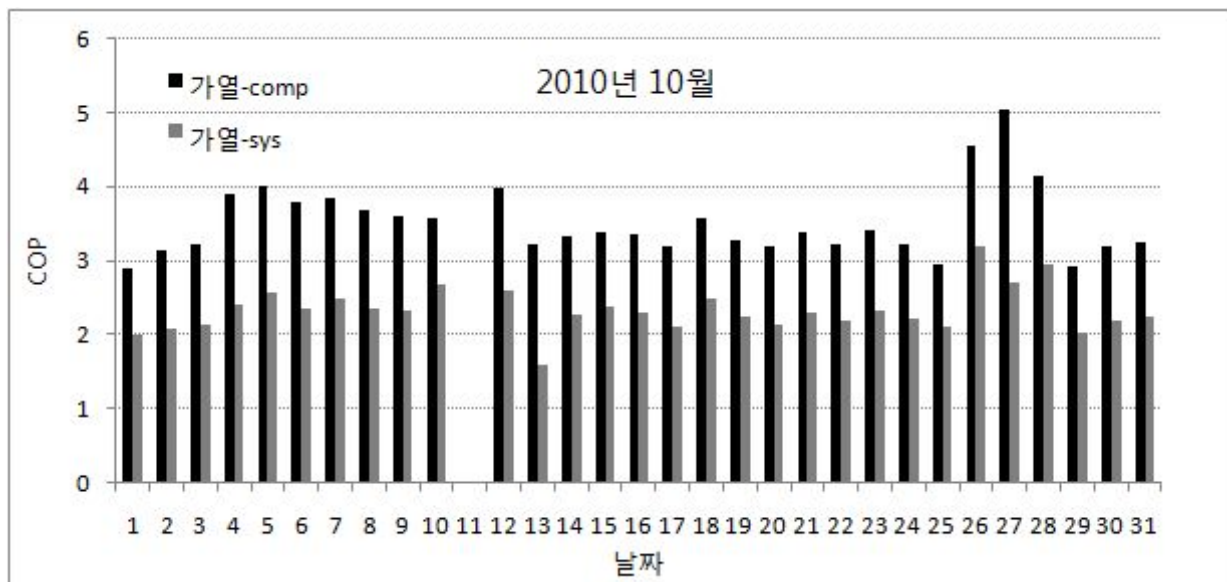
마지막에는 개발된 히트펌프의 성능은 기존의 히트펌프 성능과 비교하여 상용화 가능성을 도출하였다.

(1) 2010년 10월 성능 평가

2010년 10월의 히트펌프 성능평가 결과는 콤프레셔만을 고려한 히트펌프 성능은 냉각 COP의 경우 콤프레셔 동력만을 고려할 때 2.64 - 4.89 이고 평균 2.64로 확인되었다. 반면 물펌프의 동력까지 포함하게 되면 1.75 - 2.63 범위로 줄어들고 이 때의 평균은 1.75였다. 가열 COP의 경우 콤프레셔만 고려할 경우 2.89 - 5.03, 평균 3.51이었고, 물펌프까지 고려할 경우 1.58 - 3.19, 평균 2.33으로 확인되었다. 2010년 10월 11일의 경우 데이터 수집이 정상적으로 수행되지 않아서 성능평가 결과를 확인할 수 없었다. 세부 결과는 다음 그림 93에 그래프로 나타내었다.



(a) 냉각 성능 (Mean COP for cooling)



(b) 가열 성능 (Mean COP for heating)

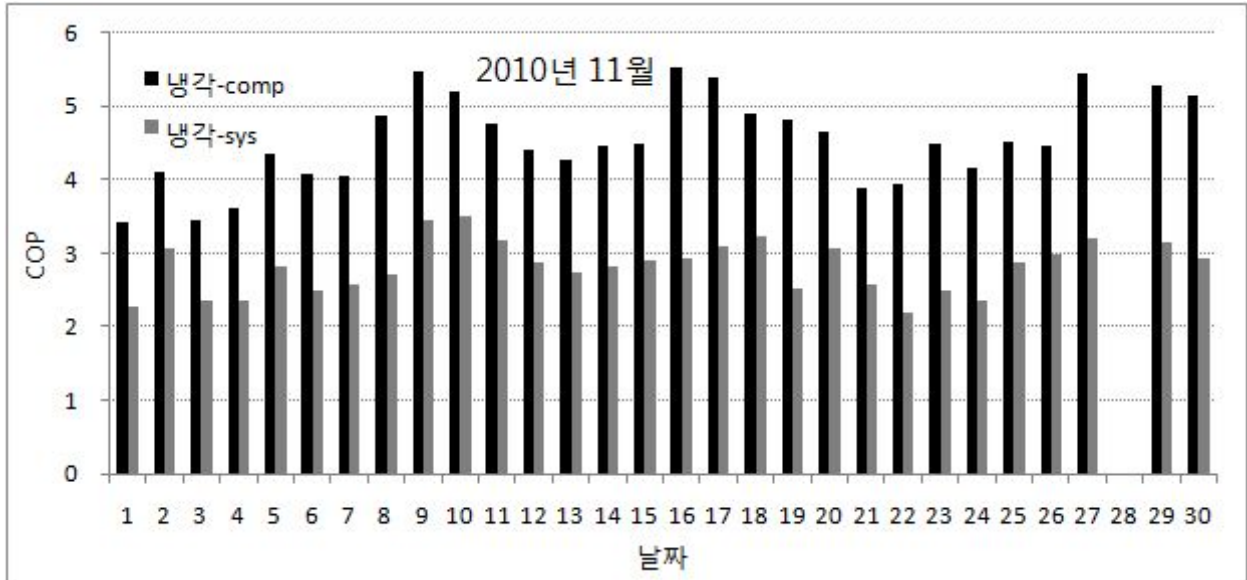
그림 93. 개발된 히트펌프의 가열 성능 (2010년 10월)

(가열-comp : 콤프레셔 동력 대비 성능, 가열-sys : 전체 동력 대비 성능)

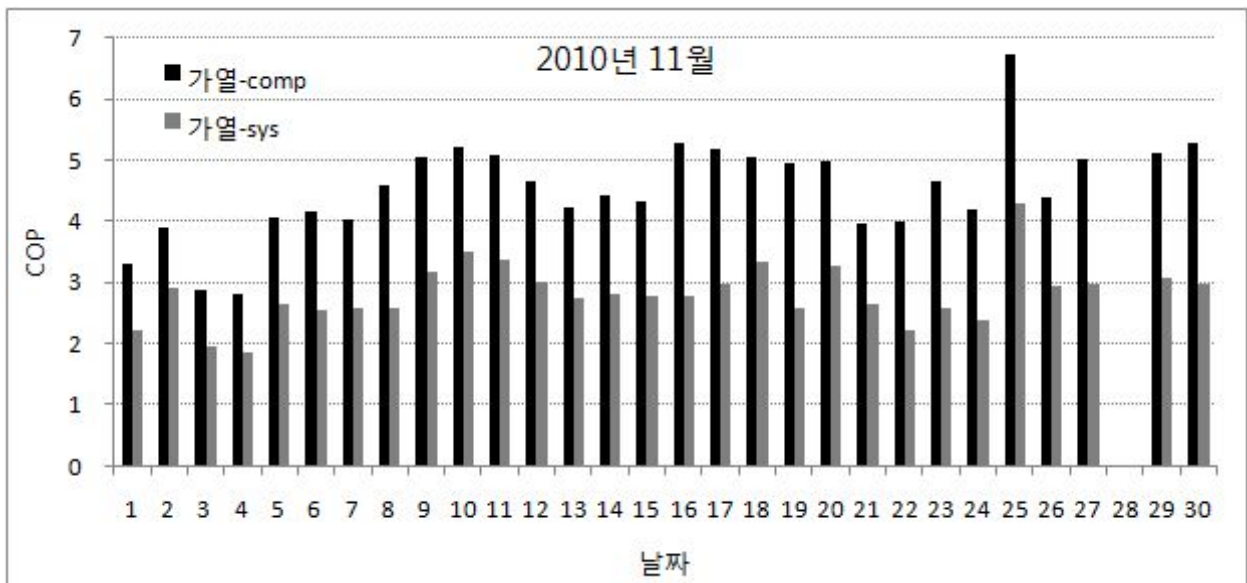
(2) 2010년 11월 성능 평가

2010년 11월의 히트펌프 성능평가 결과는 콤프레셔만을 고려한 히트펌프 성능은 냉각 COP의 경우 콤프레셔 동력만을 고려할 때 3.41 - 5.54 이고 평균 4.54로 확인되었다. 반면 물펌프의 동력까지 포함하게 되면 2.19 - 3.50 범위로 줄어들고 이 때의 평균은 2.82였다. 가열 COP의

경우 콤프레셔만 고려할 경우 2.82 - 6.74, 평균 4.54이었고, 물펌프까지 고려할 경우 1.84 - 4.29, 평균 2.82로 확인되었다. 세부 결과는 다음 그림 94에 그래프로 나타내었다. 10월에 비하여 11월의 성능이 더 좋은 것으로 평가되었다. 이는 지속적인 운영에 따른 시스템 안정화 때문인 것으로 판단된다. 2010년 11월 28일의 경우 데이터 수집이 정상적으로 수행되지 않아서 성능평가 결과를 확인할 수 없었다.



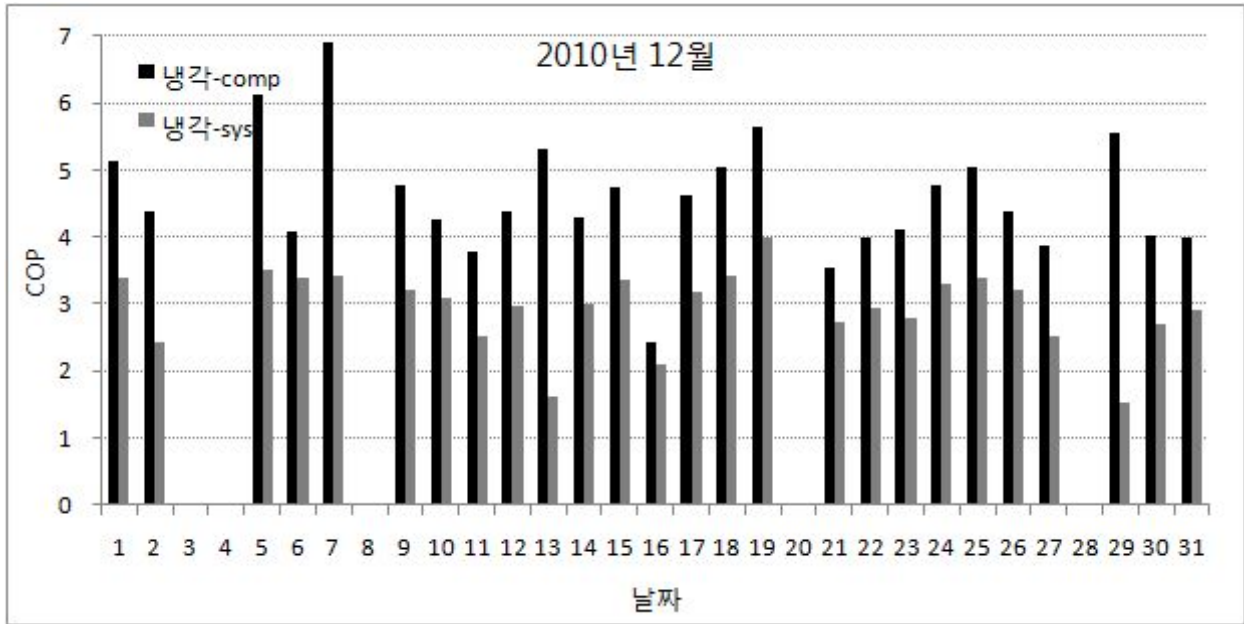
(a) 냉각 성능 (Mean COP for cooling)



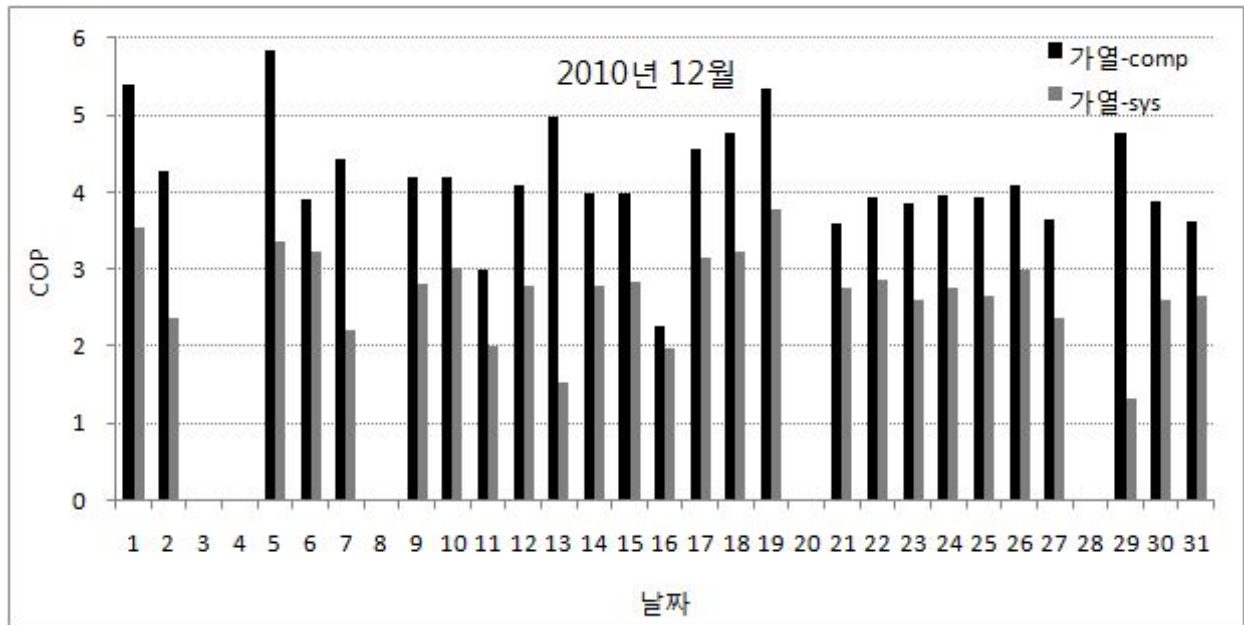
(b) 가열 성능 (Mean COP for heating)

그림 94. 개발된 히트펌프의 가열 성능 (2010년 11월)
 (가열-comp : 콤프레셔 동력 대비 성능, 가열-sys : 전체 동력 대비 성능)

(3) 2010년 12월 성능 평가



(a) 냉각 성능 (Mean COP for cooling)



(b) 가열 성능 (Mean COP for heating)

그림 95 개발된 히트펌프의 가열 성능 (2010년 12월)

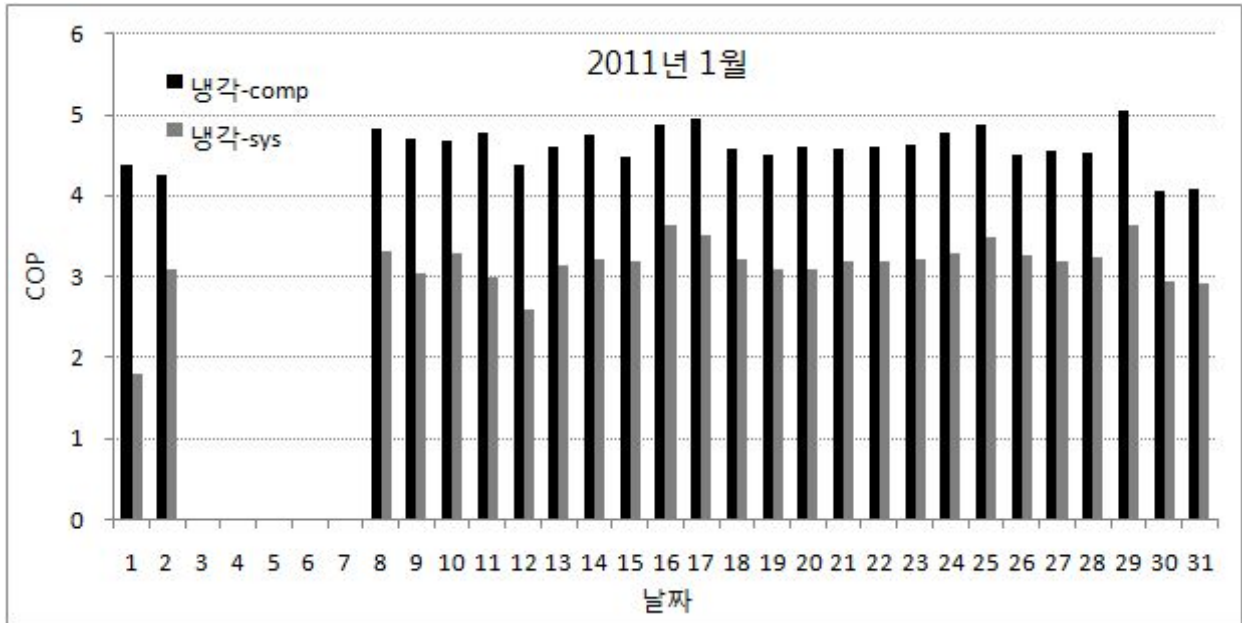
(가열-comp : 콤프레셔 동력 대비 성능, 가열-sys : 전체 동력 대비 성능)

2010년 12월의 히트펌프 성능평가 결과(그림 95)는 콤프레셔만을 고려한 히트펌프 성능은 냉각 COP의 경우 콤프레셔 동력만을 고려할 때 2.44 - 6.91 이고 평균 4.59로 확인되었다. 반면 물펌프의 동력까지 포함하게 되면 1.54 - 3.99 범위로 줄어들고 이 때의 평균은 2.95였다. 가열

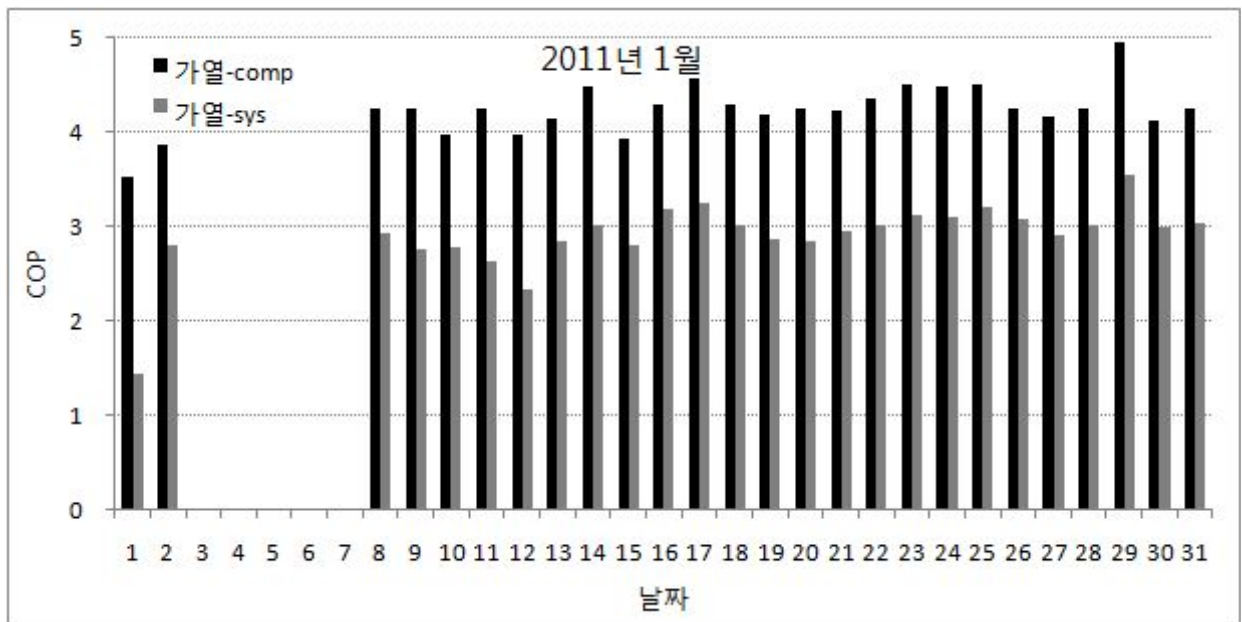
COP의 경우 콤프레셔만 고려할 경우 2.27 - 5.85, 평균 4.17이었고, 물펌프까지 고려할 경우 1.32 - 3.78, 평균 2.70로 확인되었다. 이는 11월과 비슷한 결과를 보여 주고 있지만 영하로 떨어지는 외부 기온에 의하여 배관 열손실이 증가하여 약간의 성능 저하가 있었다. 12월의 경우 한파에 의한 통신 문제 발생의 빈도가 높아져서 손실된 데이터가 많이 발생하여 성능 평가도 며칠간 수행되지 못하였다.

(4) 2011년 1월 성능 평가

2011년 1월의 경우 지속된 한파로 인하여 3 - 7일 동안 전력량 데이터 기록이 원활이 이루어지지 않는 문제가 발생하였다. 그 이외의 성능 평가 결과를 살펴보면 콤프레셔만을 고려한 히트펌프 성능은 냉각 COP의 경우 콤프레셔 동력만을 고려할 때 4.05 - 5.06 이고 평균 4.60으로 확인되었다. 반면 물펌프의 동력까지 포함하게 되면 1.79 - 3.64 범위로 줄어들고 이 때의 평균은 3.15였다. 가열 COP의 경우 콤프레셔만 고려할 경우 3.53 - 4.95, 평균 4.24이었고, 물펌프까지 고려할 경우 1.44 - 3.55, 평균 2.90로 확인되었다. 1월의 특이할 점은 냉각 COP가 더 높았다는 것인데 이는 저온에 의한 열손실이 크게 발생하면서 히트펌프 성능에 반영된 결과라고 할 수 있다. 1월 성능 평가의 세부 결과는 다음 그림 96에 그래프로 나타내었다.



(a) 냉각 성능 (Mean COP for cooling)



(b) 가열 성능 (Mean COP for heating)

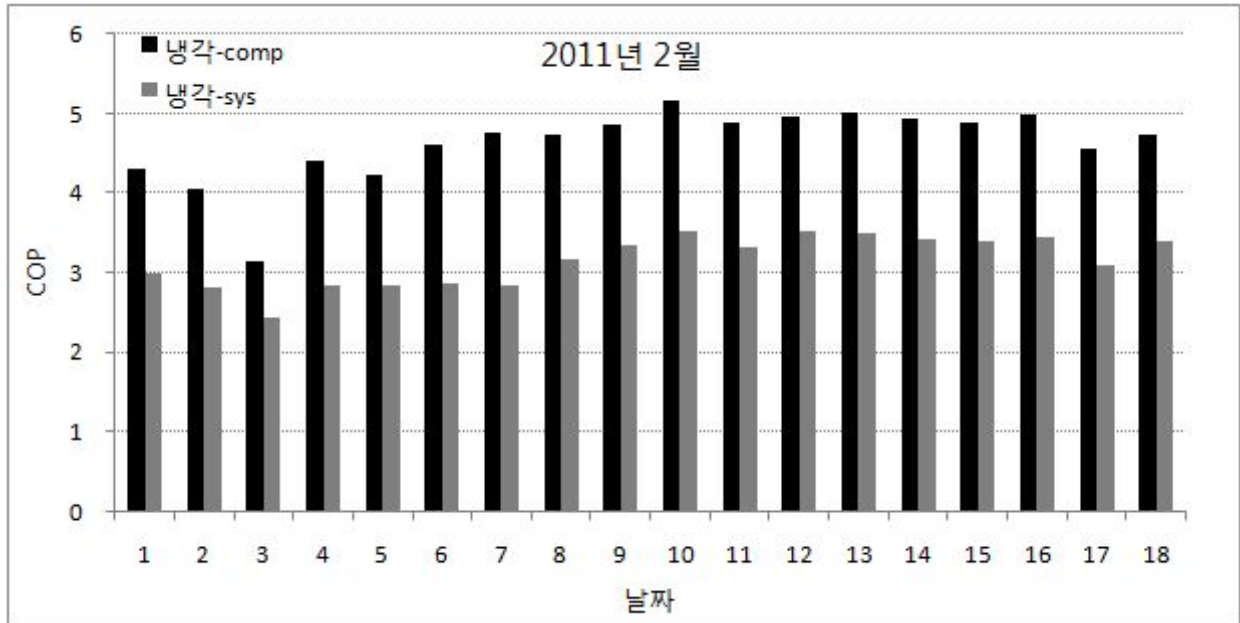
그림 96 개발된 히트펌프의 가열 성능 (2011년 1월)

(가열-comp : 콤프레셔 동력 대비 성능, 가열-sys : 전체 동력 대비 성능)

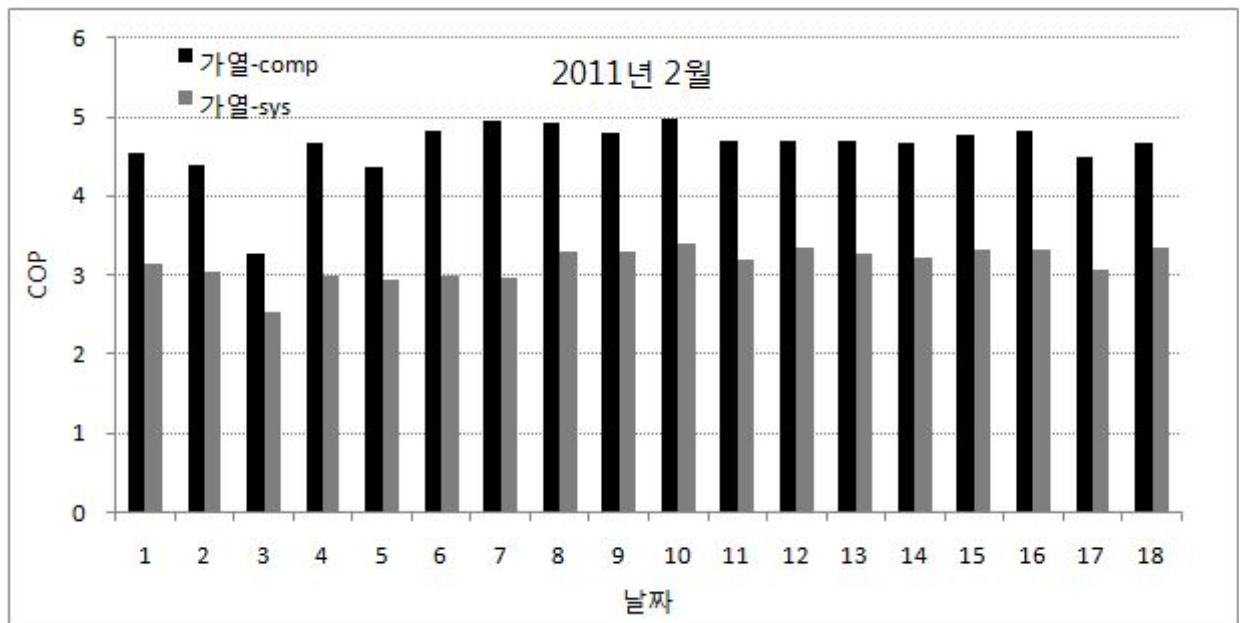
(5) 2011년 2월 성능 평가

2011년 2월의 경우 콤프레셔만을 고려한 히트펌프 성능은 냉각 COP의 경우 콤프레셔 동력만을 고려할 때 3.14 - 5.15 이고 평균 4.62으로 확인되었다. 반면 물펌프의 동력까지 포함하게 되면 2.44 - 3.53 범위로 줄어들고 이 때의 평균은 3.15였다. 가열 COP의 경우 콤프레셔만 고려할 경우 3.27 - 4.97, 평균 4.62이었고, 물펌프까지 고려할 경우 2.54 - 3.39, 평균 3.15로 확인

되었다. 이와 같은 결과는 추위가 좀 누그러지면서 12월 성능과 비슷하게 돌아온 것으로 볼 수 있다. 2월 성능 평가의 세부 결과는 다음 그림 97에 그래프로 나타내었다.



(a) 냉각 성능 (Mean COP for cooling)



(b) 가열 성능 (Mean COP for heating)

그림 97 개발된 히트펌프의 가열 성능 (2011년 2월)
 (가열-comp : 콤프레셔 동력 대비 성능, 가열-sys : 전체 동력 대비 성능)

(6) 월별 성능 비교 평가

그림 98에 보여지는 것처럼 월별 히트펌프의 성능 변화 추이를 살펴보면 설치 초기에는 조금 낮은 성능을 보여주다가 11월 이후는 냉각 성능과 가열 성능이 모두 COP 4.0 이상을 유지하고 있었음이 확인되었다. 본 성능 분석 결과가 보여주는 값은 실제로 물탱크로 회수되는 열량을 기준으로 한 것으로 온실의 에너지 관리를 위한 히트펌프로써 충분한 성능을 보여주고 있다.

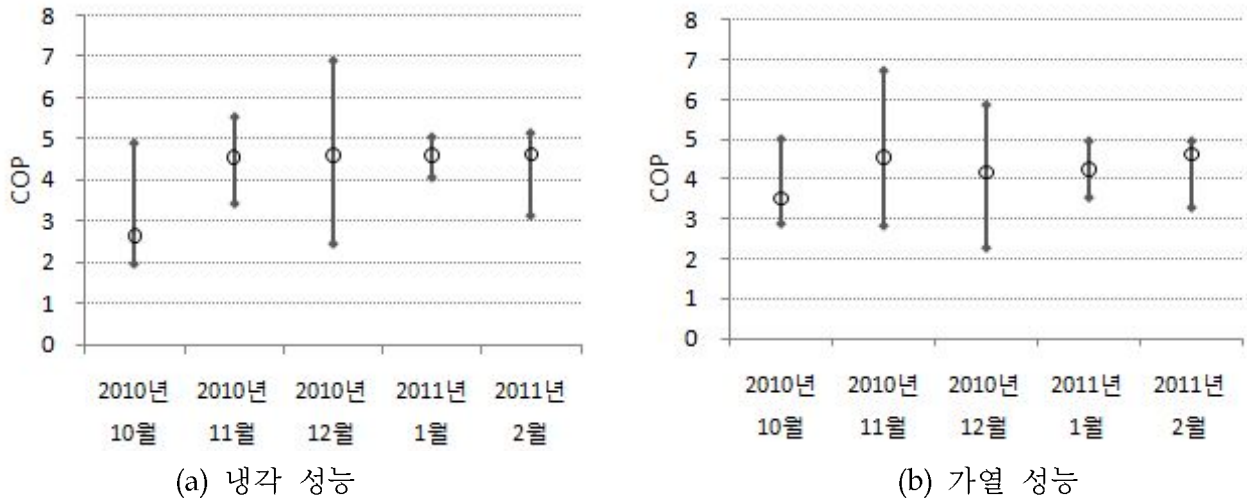


그림 98. 개발된 히트펌프의 월별 냉각 및 가열 성능(COP) 최대, 최소, 평균 비교

(7) 기존 제품과의 성능 비교 평가

성능 비교 평가를 위해 선정된 제품들은 경진TRM의 KJW, 조은에너지의 WHP, 에너컨의 EB 시리즈이다. 비록 아직 본 연구에서 개발한 히트펌프와 동일한 역할을 수행하는 히트펌프는 상용화된 바가 없지만 수-수 방식으로 작동하는 히트펌프라는 원리상 동일한 제품들을 조사하였다. 선정한 제품들은 난방방이 모두 가능한 히트펌프이고 물을 이용하여 열을 공급(난방) 또는 회수(냉방)하게 된다. 각각의 용량별 COP는 표 27 ~ 29에 정리하였다. 경진TRM의 경우 냉방성능과 난방성능이 각각 3.5 ~ 3.8, 2.6 ~ 2.8 이었고, 조은에너지는 냉방성능과 난방성능이 각각 3.2 ~ 3.4, 4.1 ~ 4.3 이었고, 에너컨은 냉방성능과 난방성능이 각각 3.3 ~ 3.8, 3.3 ~ 4.0 으로 밝히고 있다. 업체별로 성능을 평가하는 수열원의 조건과 주변 온도 조건이 다르기 때문에 업체별로 밝힌 성능을 절대 평가하는 것은 무리가 있지만 대략적인 성능은 비교해 볼 수 있다.

본 연구에서 개발한 성능은 그림 98에서 분석한 것처럼 냉방성능은 2.64 ~ 4.62, 난방성능은 3.51 ~ 4.62로써 기존 제품에 상회하는 성능을 보여주었다. 따라서 개발된 히트펌프의 상용화 시에 충분한 성능 경쟁력도 갖추고 있다고 판단된다.

표 28. 기존 제품의 용량별 성능 (업체: (주)경진TRM)

모델명	KJW-300	KJW-400	KJW-500	KJW-600	KJW-800	KJW-1000	KJW-1200
난방용량 (kW)	135	174	206	271	352	444	533
냉방용량 (kW)	97	126	150	197	256	325	392
소비전력 (kW)	38	48	56	74	96	119	141
난방성능 (COP)	3.6	3.6	3.7	3.7	3.7	3.7	3.8
냉방성능 (COP)	2.6	2.6	2.7	2.7	2.7	2.7	2.8

표 29. 기존 제품의 용량별 성능 (업체: 조은에너지)

모델명	WHP-180	WHP-210	WHP-240	WHP-360	WHP-420
난방용량 (kcal/h)	40,859	47,328	64,781	81,718	94,656
난방소비전력 (kW)	13.9	17.4	22.6	27.9	34.9
난방성능 (COP)	3.4	3.2	3.3	3.4	3.2
냉방용량 (kcal/h)	33,212	39,191	55,173	66,423	78,382
냉방소비전력 (kW)	9	11.2	14.9	18	22.5
냉방성능 (COP)	4.3	4.1	4.3	4.3	4.1

표 30. 기존 제품의 용량별 성능 (업체: 에너컨)

모델명	EB-075G	EB-100G	EB-140G	EB-310G
난방용량 (kcal/h)	21,700	32,000	43,100	91,200
난방소비전력 (kW)	6.7	10.2	15	29
난방성능 (COP)	3.8	3.6	3.3	3.7
냉방용량 (kcal/h)	19,700	29,000	38,700	81,900
냉방소비전력 (kW)	5.7	8.6	13.6	24.6
냉방성능 (COP)	4.0	3.9	3.3	3.9

2. 연소열 회수식 CO₂ 발생기

본 연구에서 개발된 탄산가스 발생기의 성능 평가에는 CO₂ 공급 효과에 대한 평가와 연소열의 회수 효과에 대한 평가가 동시에 이루어져야 한다. 또한 기존의 탄산가스 발생기와는 다르게 본 연구에서 개발된 탄산가스 발생기는 온실로 공급되는 탄산가스의 온도를 온실의 온도와 동일하게 공급하여 냉난방으로 인한 환경 제어 수행에 변수로 작용하지 않도록 한다는 특징이 있다. 따라서 연소 공기의 온도에 대한 평가가 이루어져야 한다.

가. CO₂ 공급 성능 평가

먼저 온실의 탄산가스 운영결과를 평가해 보면, 실험 온실은 해가 뜬 이후부터 4시간 동안 탄산가스를 1000 - 1500 ppm으로 운영하도록 설정되었다. 따라서 탄산가스 발생기는 오전 7:30분부터 오전 11:30분까지 작동되었고, 1300 ppm 수준의 농도에서 자동 제어를 수행하였다. 다음의 그림 99는 2월 1일부터 7일까지 일주일 동안을 10분 단위 CO₂ 농도 변화 그래프이다. 그림에서 보는 것처럼 온실의 CO₂ 농도는 오전 7시 30분부터 농도가 상승하기 시작하여 약 60분 뒤부터 3시간동안 1100 - 1500 ppm 범위에서 유지되었음을 확인해 볼 수 있다.

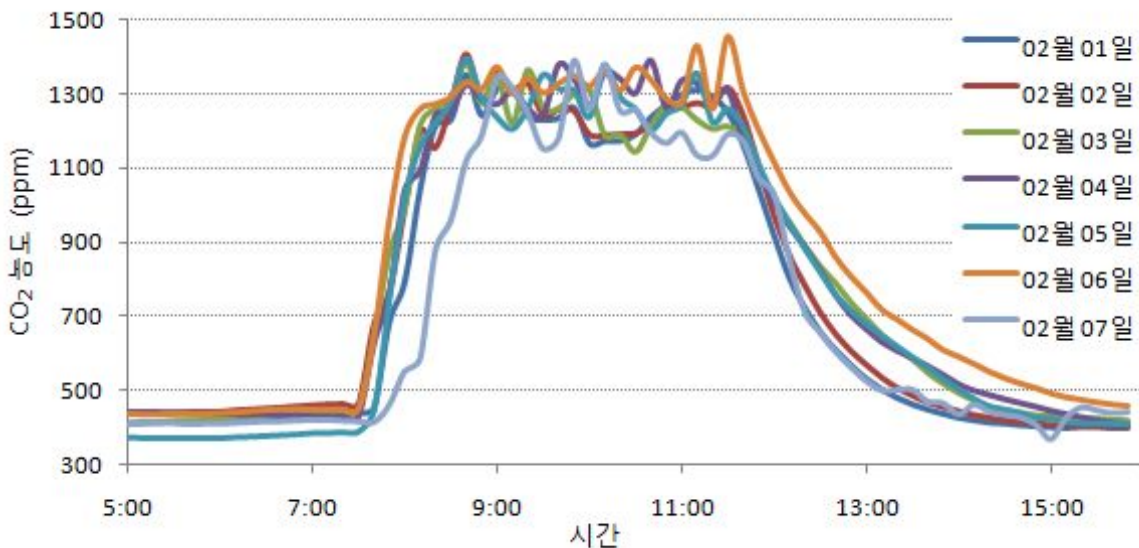


그림 99. 탄산가스 공급기 운영결과 온실의 CO₂ 농도 변화

2010년 10월부터 2011년 1월까지의 탄산가스 공급시간대(오전 9:00부터 오전 11:30까지)의 일별 최대, 최소, 평균값은 그림 100 ~ 103에 나열된 그래프와 같다. 최대, 최소 농도의 차이가 300 ppm 이하인 날은 안정적으로 탄산가스가 공급이 안정적으로 수행된 날이고 최대, 최소 농도의 차이가 300 ppm 이상인 경우는 저온, 온실작업, 장비 점검 등의 이유로 온실 내부의 탄

산가스 누수가 심하게 발생한 결과로 판단해 볼 수 있다. 하지만 평균 농도는 1000 - 1400 ppm 안에서 유지되고 있었음을 확인할 있었고, 이와 같은 결과는 원하던 탄산가스 농도조절이 성공적으로 수행되었음을 확인해 준다. 몇몇 평균 농도가 매우 낮게 기록된 날이 확인되는데 이것은 저온으로 인한 LPG 기화량 부족 문제, LPG 사용량 확인이 어려웠던 문제들로 인한 것으로 1월 이전에 모두 해결되었다(앞의 “에너지 절약형 환경 관리 기계 설비의 보완” 부분에서 자세히 설명됨).

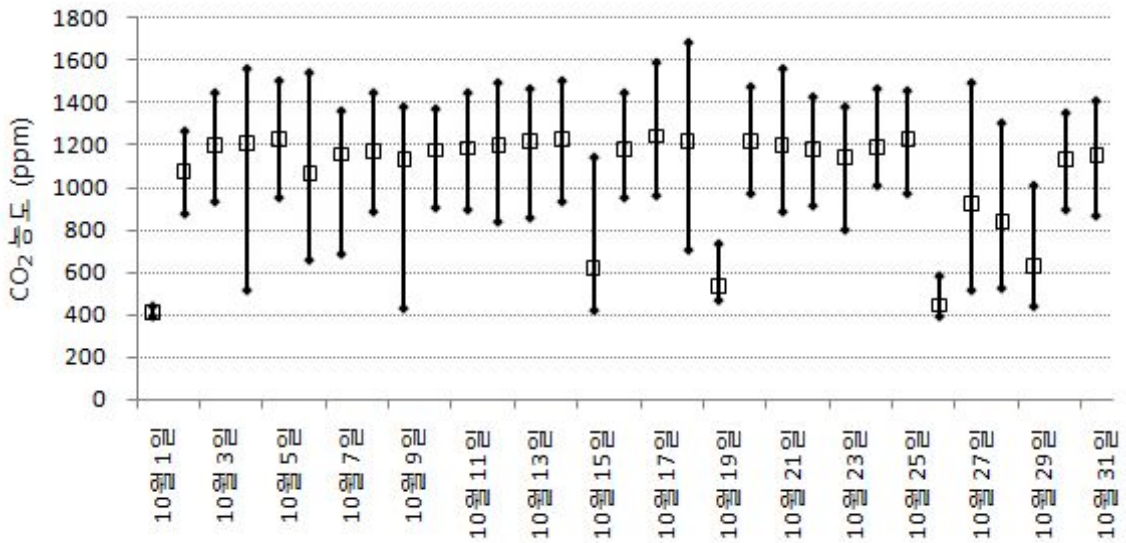


그림 100. 2010년 10월 CO₂ 발생기 운영 결과 (최대, 최소, 평균)

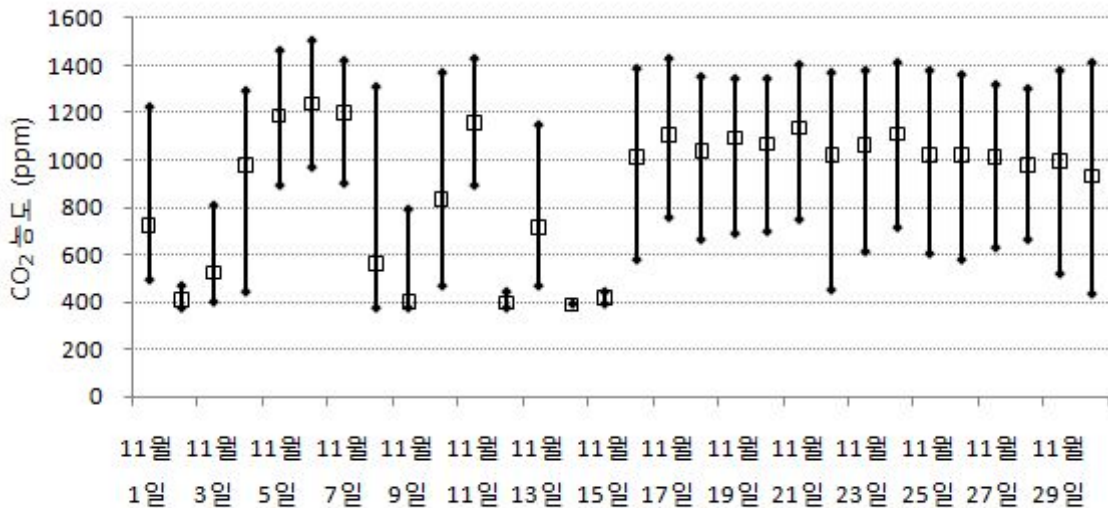


그림 101. 2010년 11월 CO₂ 발생기 운영 결과 (최대, 최소, 평균)

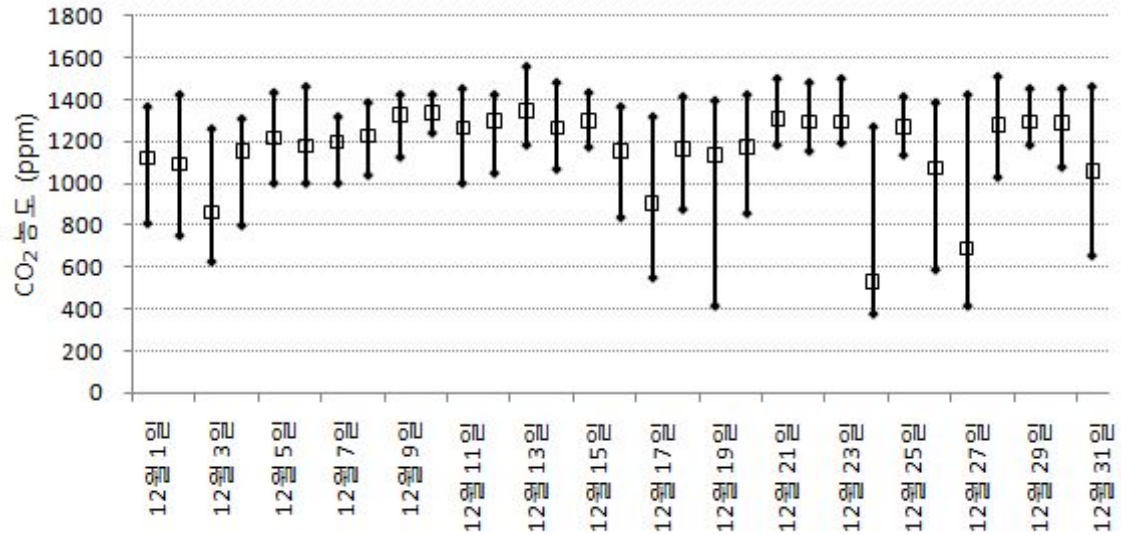


그림 102. 2010년 12월 CO₂ 발생기 운영 결과 (최대, 최소, 평균)

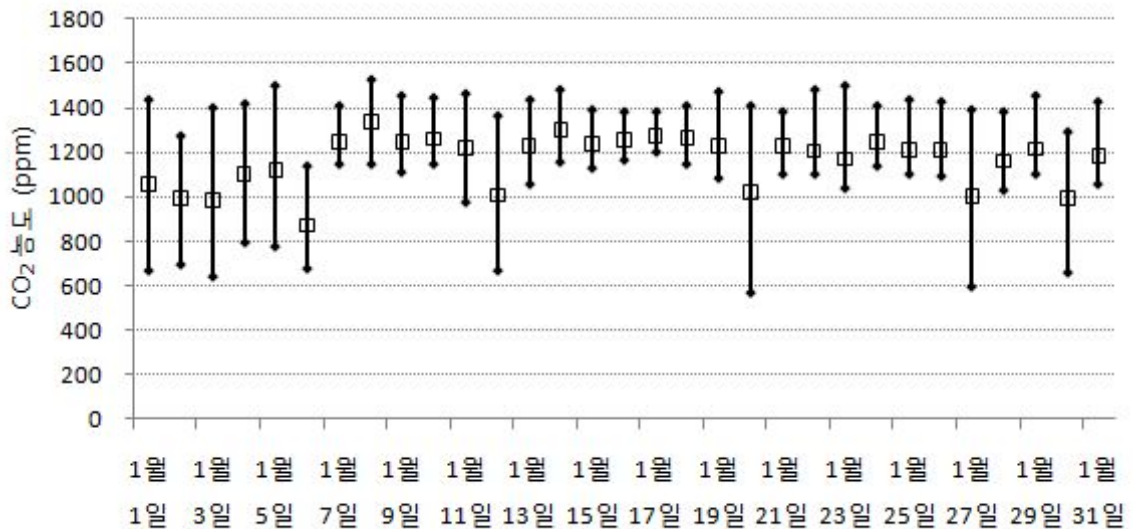


그림 103. 2011년 1월 CO₂ 발생기 운영 결과 (최대, 최소, 평균)

나. CO₂ 발생기의 연소열량 회수 성능 평가

본 연구에서 개발된 CO₂ 발생기는 히트펌프 시스템과 통합되어 이산화탄소 공급시에 발생한 연소에 의한 열량을 저온수 탱크로 회수하여 저장하게 된다. 이때 회수된 열량은 CO₂ 발생기의 열교환부에 순환되는 유량과 CO₂ 발생기의 열교환기 전후의 온도 차이로 계산할 수 있고, LPG연소시의 열량은 LPG의 표준 발열량으로 산출해 볼 수 있다. CO₂ 발생기의 열회수 성능

평가를 위한 온도, 유량 측정 위치는 그림 104에서 확인해 볼 수 있고, 회수열 산출식과 열 회수율 산출식은 식 (12), 식 (13)과 같다.

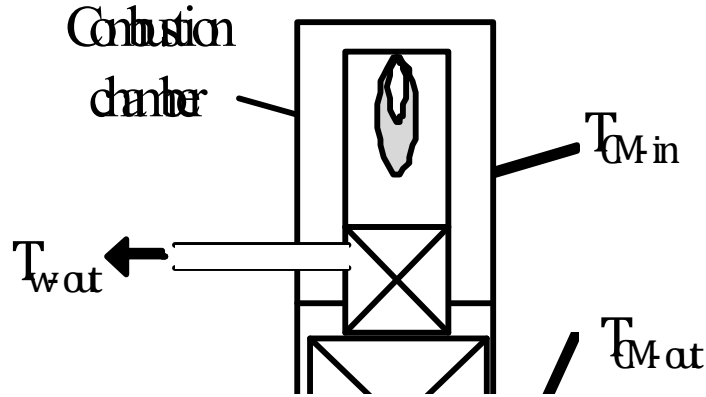


그림 104. CO₂ 발생기의 열회수 성능 평가를 위한 온도, 유량 측정 위치

$$q = \rho_{wt} c_{wt} Q_{wt} (T_{wt-out} - T_{wt-in}) \quad (14)$$

q : 회수열량 (kcal)

ρ_{wt} : 물의 밀도 (kg/m³)

c_{wt} : 물의 비열 (kcal/kg)

Q_{wt} : 냉각수 유량 (m³/sec)

T_{wt-out} : 열교환기 배출수 온도

T_{wt-in} : 열교환기 유입수 온도

$$q = \frac{\rho_{wt} c_{wt} Q_{wt} (T_{wt-out} - T_{wt-in})}{m_{LPG} HV_{LPG}} \quad (15)$$

m_{LPG} : 사용 LPG량의 무게 (kg)

HV_{LPG} : LPG의 발열량 (kcal/kg)

식 (14)와 식 (15)에 따라서 1월 달의 일별 탄산가스 발생기의 열 회수 성능을 평가해 보았는

데 그 결과는 그림 105과 같다. 먼저 LPG는 무게 기준으로 하루에 약 2.3 - 3.3 kg 정도 연소된 것으로 측정되었고, 회수된 열량은 하루에 200000 kcal 수준인 것으로 확인되었다. LPG의 발열량을 12000 kcal/kg으로 하여 열 회수율을 산출한 결과, 본 연구에서 개발된 탄산가스 발생기의 열 회수율은 평균 54.9% 인 것으로 산출되었다. 일반 가스 보일러의 연소 효율이 80% 초반에 있는 것과 비교해 보면 본 연구에서 개발된 탄산가스 발생기의 CO₂ 공급 성능 뿐만 아니라 열회수 성능도 충분이 이루어지고 있음을 확인해 볼 수 있다.

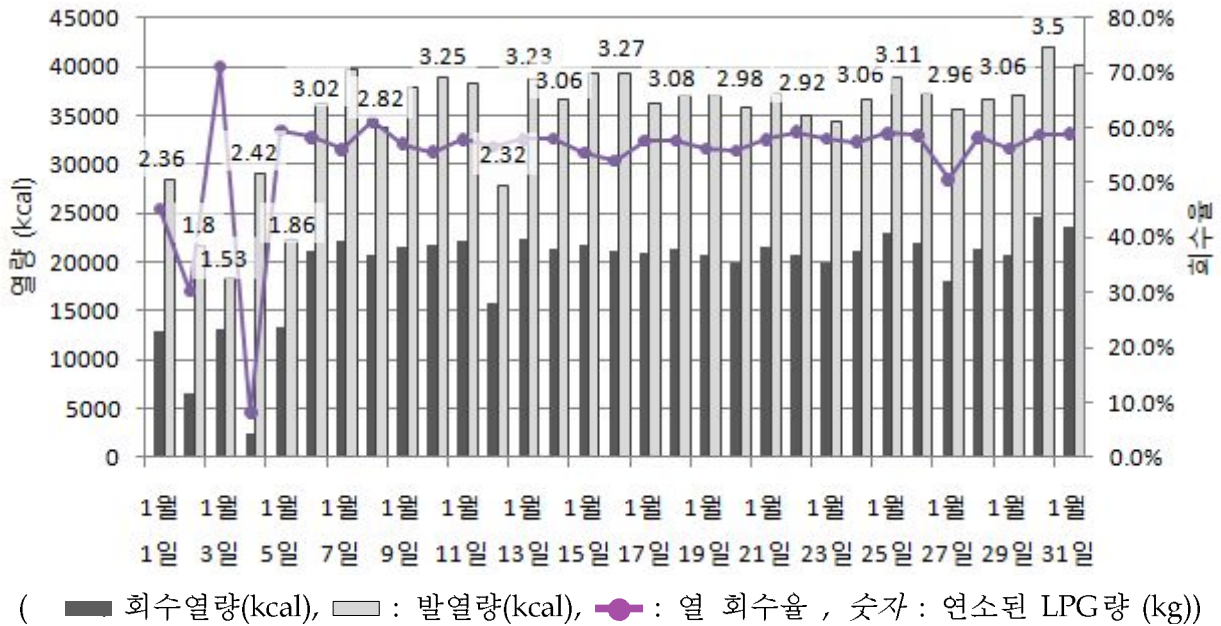


그림 105. 개발된 CO₂ 발생기의 열 회수 성능

다. CO₂ 발생기의 탄산가스 공급온도 제어 성능 평가

본 연구에서 개발한 탄산가스 발생기의 또 다른 특징이 공급되는 탄산가스의 온도가 온실의 환경 제어를 방해하지 않는 것이다. 기존의 온풍방식의 경우 난방 효과가 있는 장점이 있지만 난방이 더 이상 필요 없는 상황에서는 탄산가스 공급이 불가능해지는 문제를 갖고 있다. 따라서 탄산가스 발생기의 마지막 성능평가 내용은 온실로 공급되는 탄산가스의 온도가 온실 내부 온도와 얼마나 비슷한가가 된다. 이 성능 평가를 위해서 탄산가스 발생기에서 공급되는 탄산가스의 최종 온도를 측정하였고 측정 위치는 다음 그림 106에서 보는 것과 같다.



그림 106. 공급 온도의 측정 위치

그림 107은 2011년 1월 24일, 탄산가스 공급 시간에 측정한 데이터를 정리한 것으로 외기 온도, 온실 온도, 공급 온도를 비교하고 있다. 굵은 실선이 공급되는 탄산가스의 온도를 지시하고 있는데 탄산가스가 공급되면 온도가 올라가고, 공급이 중단되면 온도가 내려간다. 따라서 온도가 올라간 부분의 공급온도 부분과 온실온도 부분을 비교하면 되는데 거의 일치하면서 공급되고 있는 모습을 확인할 수 있다.

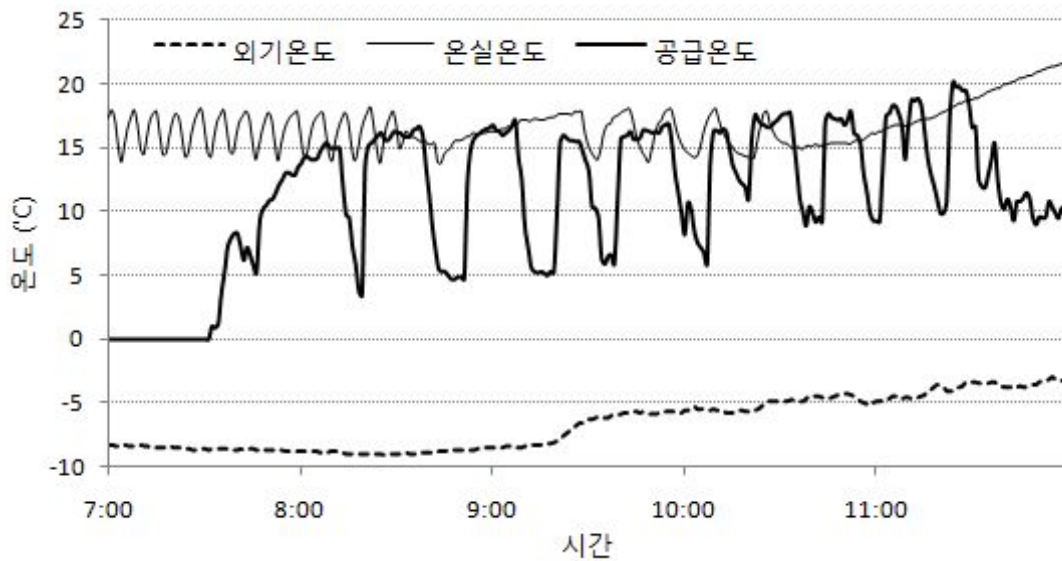


그림 107. 이산화탄소 공급 온도와 온실 온도의 비교 (2011년 1월 24일)

3. 태양복사 에너지에 의한 잉여열 회수 성능 평가

시스템이 다 갖추어진 복합 환경-에너지 관리 온실은 주간에 광량이 풍부하여 온실의 온도가 올라가면 이 열에너지를 회수하여 저장할 수 있다. 이와 같은 에너지를 태양복사에 의한 온실의 잉여 열에너지라고 할 수 있는데, 이 에너지를 활용할 경우 에너지 절감효과를 크게 누릴 수 있다. 태양복사 에너지에 의한 잉여열은 다음의 그림 108의 온도 관계에서 명확하게 확인해 볼 수 있다. 그림 108의 데이터는 본 실험의 유리온실에서 실측한 것이데, 야간에는 난방에 의하여 16℃로 온실 내부 온도(T_i)가 유지되고 있고 해가 뜬 뒤 온실 내부 온도는 태양복사 에너지에 의하여 상승하게 된다. 그림에서 보는 것처럼 외기 온도(T_o)는 오후 2시경 30℃까지 상승되는 것을 확인 할 수 있다. 본 연구의 시험 작물인 장미의 경우 25℃가 생육에 적합한 최대 온도이므로 25℃ 이상에 해당하는 부분이 회수하여 활용할 수 있는 열에너지 부분이 된다.

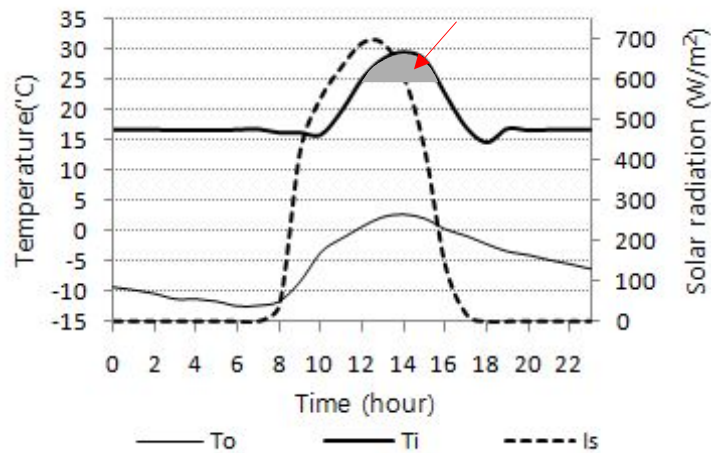


그림 108 태양복사 에너지에 의한 잉여열
(T_o : 외기 온도, T_i : 내부 온도, I_s : 일사량)

본 연구에서 개발된 시스템은 잉여열을 회수할 온도를 설정해 두면 저온수 탱크의 물이 온실 내부의 FCU로 순환하면서 열을 회수하게 된다. 이 때 저온수 탱크에서 온실로 공급되는 온도와 저온수 탱크로 돌아오는 온도, 순환되는 유량을 측정하여 회수되는 열량을 산출할 수 있는데 그 식은 다음 식 (16)과 같다.

$$q_{sp} = \rho_{wt} c_{wt} Q_{wt} (T_{wt-out} - T_{wt-in}) \quad (16)$$

q_{sp} : 잉여 열에너지 (kcal)

ρ_{wt} : 물의 밀도 (kg/m^3)

c_{wt} : 물의 비열 (kcal/kg)

Q_{wt} : 물 유량 (m^3/sec)

T_{wt-out} : 온실 FCU 배출수 온도

T_{wt-in} : 온실 FCU 유입수 온도

2010년 10월부터 2011년 2월까지 개발된 시스템의 운영으로 회수된 태양복사에 의한 잉여 열에너지는 다음 표 31에 정리하였다. 표 31에서 보는 것과 같이 2010년 10월부터 2010년 2월까지 각각 1,421,774 kcal, 742,112 kcal, 218,391 kcal, 68,106 kcal, 192,548 kcal를 회수한 것으로 확인되었다. 외기 온도가 영하로 떨어지지 않는 10월, 11월의 경우 하루 50,000 - 100,000 kcal 가량 잉여 열에너지가 회수될 수 있었지만, 가장 추웠던 1월의 경우 한 달 동안의 총 회수 열량이 68,000 kcal 수준이었다. 따라서 10월, 11월까지는 보조 열원 없이 태양복사로 인한 잉여열과 탄산가스 발생기에서 공급되는 회수열로 야간 난방이 충분히 수행될 수 있었으나, 12월, 1월, 2월의 경우 보조열원이 부족한 열량을 보충해 주어야만 야간에 난방을 원활히 수행할 수 있었다.

표 31. 회수된 태양복사에 의한 잉여 열에너지 (단위 : kcal)

날짜	2010년 10월	2010년 11월	2010년 12월	2011년 1월	2011년 2월
1	96186	41454	1650	0	18151
2	8989	58958	954	0	14785
3	106994	35646	8638	0	0
4	20491	40873	11580	604	0
5	115523	7564	19120	0	2598
6	96476	1307	12250	0	0
7	51053	0	21627	5689	0
8	45005	0	0	0	7376
9	46668	30326	26006	3853	11104
10	44675	53500	1646	3076	0
11	11856	31065	28490	0	20431
12	0	32214	12844	4233	11576
13	3395	20074	0	8522	8657
14	25098	26221	7912	0	0
15	39186	33908	1549	0	19354
16	37725	8016	6987	0	0
17	27542	16528	0	0	0
18	24814	44263	13493	1773	36668
19	66159	0	0	1611	41848
20	29651	47653	12762	3793	
21	44512	11008	17376	8102	
22	58282	1352	6855	8400	
23	49604	37791	0	0	
24	33282	2703	0	0	
25	52017	38254	0	0	
26	61062	38835	0	5694	
27	8247	5961	0	0	
28	73198	32002	0	0	
29	50087	44636	6652	6188	
30	52815	0	0	5115	
31	41182		0	1453	
합계	1421774	742112	218391	68106	192548

4. 복합 환경-에너지 관리 시스템의 종합 성능 평가 (에너지 절감 위주)

온실 에너지 절감 측면에서 보면, 본 연구에서 개발된 시스템은 태양광으로 부터의 잉여 열 에너지, 탄산가스 발생기로 부터의 열에너지, 보광에서 발생하는 열에너지를 모두 회수하여 저장하였다가 필요한 시기에 이용할 수 있는 기능으로 인하여 효과적으로 에너지 절감을 수행할 수 있게 된다. 따라서 하루 동안에 회수하여 저장하는 열량을 산출하고 난방에 소모된 열량을 산출하여 비교하면 얼마만큼의 에너지가 절감 되었는가를 확인해 볼 수 있다. 개별 장치에 따른 열회수 성능은 앞서서 모두 평가를 하였고, 통합된 에너지 절감 효과는 다음 Eq. 12를 이용하여 산출되었다. 평가 기간은 2010년 10월부터 2011년 2월까지 5개월간 수행되었다.

$$\eta = \frac{q_{sp} + q_{CO_2} + q_{light}}{q_{heating}} \quad (17)$$

η : 에너지 절감율

q_{sp} : 태양복사에 의한 잉여열 회수량 (식 16)

q_{CO_2} : 탄산가스 발생기의 열 회수량 (식 15)

q_{light} : 보광에 의한 열 공급량

$q_{heating}$: 온실 난방 공급량

가을에 해당하는 2010년 10월과 11월의 경우 난방부하가 회수되는 열량에 크게 못 미치기 때문에 본 시스템을 이용할 경우 야간의 난방을 위한 추가 에너지 공급은 필요하지 않다. 그림 109이 가을철에 복합 환경-에너지 관리 시스템을 이용한 온실 운영시 에너지 절감율을 표시한 것이다. 10월 초의 경우 절감율이 1,000%를 넘어가는 날이 많았는데 표시의 편의를 위해서 300% 이상인 값은 모두 300%로 표시하였다. 10월 말부터 11월까지의 약 9일이 100%이하로 떨어진 것이 확인되었으나, 전날 충분히 공급된 열량으로 인하여 난방에 필요한 추가 에너지는 없었다.

겨울에 해당하는 2010년 12월, 2011년 1월, 2월의 경우 에너지 절감율이 모두 100% 이하였기 때문에 추가적인 열공급이 필요 하였다. 12월 평균 에너지 절감율은 40.2%, 1월과 2월의 에너지 절감율은 각각 18.4%, 37.3%였다. 2월은 날씨가 점점 따듯해짐에 따라 말일까지의 결과를 합산하면 12월과 비슷한 수준인 40%까지 도달할 것으로 예상된다. 겨울철 날짜별 에너지 절감율은 그림 110에 도시하였다.

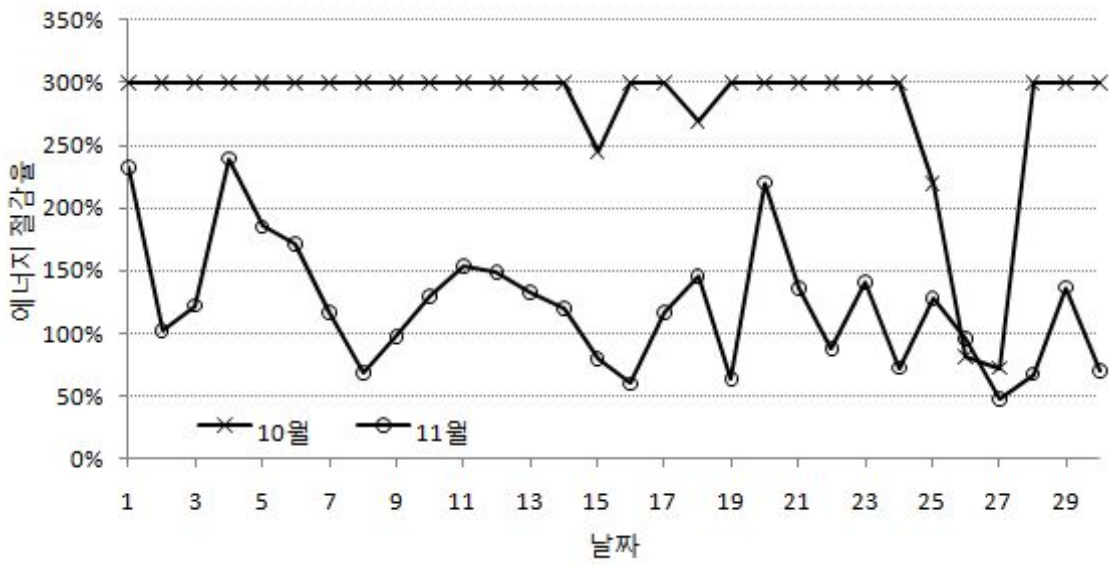


그림 109. 복합 환경-에너지 관리 시스템 이용시 가을철 에너지 절감율
(편의를 위해서 300% 이상인 값은 모두 300%로 표시함)

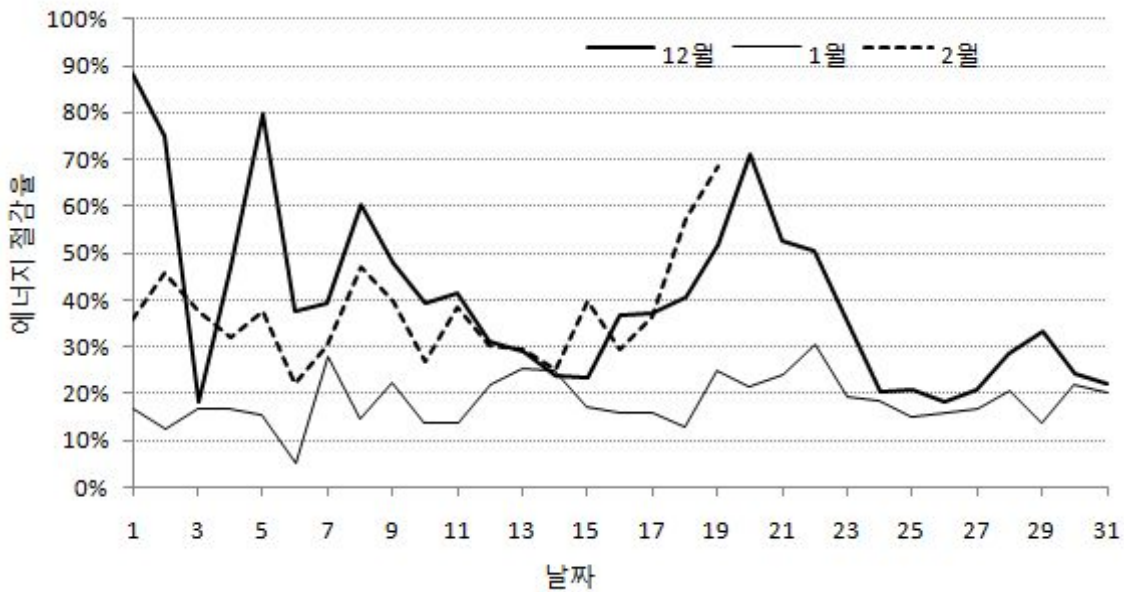


그림 110. 복합 환경-에너지 관리 시스템 이용시 겨울철 에너지 절감율

5. 고온기의 시스템 성능 평가

가. 개요

본 연구에서 복합 환경-에너지 관리 시스템은 난방이 필요한 시기에 효과적인 환경 제어와 에너지 절감을 동시에 달성하기 위한 목적으로 개발되었다. 하지만 개발된 시스템을 이용하여 초기의 목적에서 더 나아가 여름철 고온기에 본 시스템을 활용할 수 있는 방안을 본 절에서 제시하고자 한다.

본 연구에서 개발된 히트펌프 시스템의 온실 내 공기열 회수 기능은 환경 제어 면에서 냉방 효과이다. 따라서 복합 환경-에너지 관리 시스템은 냉방 기능을 수행할 수 있다. 하지만 한여름에 기온이 35℃를 상회하는 우리나라의 기후 조건에서 작물 생육에 적합한 온도인 25 ~ 27℃ 이하로 냉방을 수행하기 위해서는 대용량을 냉방부하 용량을 갖는 냉방 장치와 엄청난 에너지가 소모된다. 따라서 단순히 냉방만을 수행하는 것으로서 현실적으로 경제적인 온실 운영은 어렵다.

본 절에서 제시하려는 방안은 식물의 광합성이 활발한 오전시간에 집중적으로 냉방을 수행하여 온실을 밀폐 상태로 유지하고, 동시에 이산화탄소를 공급함으로써 여름철에 고농도 이산화탄소 시비를 수행하는 것이다. 식물의 광합성은 보통 해가 뜬 이후 약 2시간 동안이 CO₂를 활발하게 흡수하는 것으로 알려져 있다. 따라서 상대적으로 기온이 낮은 야간에 냉방 열에너지를 축적하였다가 오전 해가 뜬 이후 2~4시간 동안 집중적으로 축적한 냉방 에너지를 사용하고 동시에 CO₂를 공급해 준다면 경제적으로도 이득이 되는 온실 운영을 할 수 있을 것으로 판단되었다.

나. 고온기 냉방 및 이산화탄소 공급 전략

태양 복사 에너지가 커지면 온실 내부 온도는 식물의 생육 적합 온도를 쉽게 초과하게 된다. 게다가 연소식 이산화탄소 발생기에서 공급되는 배기가스의 온도가 높으면 온실 내부 온도는 더 신속하게 상승할 것이다. 하지만 온실에 고농도의 이산화탄소를 공급하기 위해서는 온실이 밀폐 상태를 유지해야 하고 이를 위해서 냉방이 필요하게 된다. 따라서 본 연구에서는 히트펌프 시스템의 저온 축열조에 미리 충분한 냉수를 확보한 뒤 활용해야 한다. 저온기의 경우 저장된 열에너지가 난방으로 소모되기 때문에 쉽게 저온 축열조의 냉수를 확보할 수 있다. 하지만 고온기의 경우 난방이 수행되지 않기 때문에 고온 축열조에 장착된 FCU를 이용하여 회수된 열에너지를 대기 중으로 방출시켜야 한다. 이와 같은 문제들을 고려하여 고온기 이산화탄소 공급 제어 순서 및 전략을 마련하였다. 그 내용은 다음 표 32과 같다.

표 32. 고온기 이산화탄소 공급 제어 순서 및 전략

번호	수행 내용	설 명
1	저온 축열조의 냉수를 이용한 냉방 에너지 확보	외부 FCU를 이용하여 회수된 열에너지를 방출함으로써 냉방 에너지를 확보한다.
2	환기를 정지하고 온실의 밀폐 상태 유지	고온기에는 야간에도 환기가 정지되지 않는다. 따라서 환기를 강제로 정지시켜야 한다.
3	CO ₂ 발생기를 작동, 배기가스 열에너지를 회수	CO ₂ 발생기 운영중에 저온 축열조의 냉수를 CO ₂ 발생기 내의 열교환기로 순환시켜 저온의 배기가스를 획득한다.
4	온실 내부 온도가 높으면 공기 열에너지 회수	저온 축열조의 냉수를 온실내 FCU로 순환하여 온실을 냉방한다. 따라서 온실의 밀폐 상태가 유지된다.
5	저온 축열조 온도가 높아지면 히트펌프 가동	히트펌프는 저온 축열조의 열에너지를 고온 축열조로 이동시켜 주기 때문에 저온 축열조의 온도는 저온을 유지하게 된다.
6	고온 축열조 온도가 높아지면 외부 FCU 작동	외부 FCU를 작동시키면 고온 축열조의 열에너지가 방출된다. 따라서 히트펌프를 계속 작동시킬 수 있다.
7	CO ₂ 발생기 정지	목표한 이산화탄소 공급 시간이 지나면 CO ₂ 발생기를 정지시킨다.
8	한 시간 이후 환기를 재개한다.	식물이 남아 있는 고농도 이산화탄소를 흡수하는 동안 (3) ~ (5)의 작동을 반복한다. 이 작업은 1시간 정도 수행하면 이산화탄소 흡수가 끝난 것으로 보고 환기를 수행한다.

다. 고온기 이산화탄소 공급에 따른 환경 변화

고온기의 복합 환경-에너지 관리 시스템의 운영 전략에 따른 온실의 환경 변화를 봄철과 여름철의 전형적인 환경 제어 결과는 다음 그림 111, 112와 같다. 봄철인 2011년 4월 23일의 환경 제어 결과를 보면 (그림 111) 오전 7시경 CO₂ 농도는 상승하기 시작한다. 태양광 복사 에너지에 의해서 오전 8시경부터 온실의 온도는 상승하기 시작하는데 9시 30분 경 온실의 온도는 25℃를 초과하여 공기열 회수(냉방)가 시작된다. 따라서 오전 9시 30분에서 11시까지 온실의 온도는 25 ~ 26℃를 유지하는 것이 확인된다. 공기열 회수로 인하여 온실의 밀폐 상태가 유지

되기 때문에 CO₂ 농도는 오전 7시30분에서 11시까지 1100 ~ 1400 ppm으로 유지되는 결과가 확인된다.

여름철인 2011년 7월 31일의 경우 (그림 112) 오전 7시경 이미 외기 온도가 27℃를 초과하기 때문에 기존 방식에서는 이산화탄소 공급이 어렵지만 본 시스템을 이용하여 공기열 회수를 통하여 온실의 온도를 26 ~ 27℃를 유지하였고 온실의 밀폐상태가 유지되었다. 따라서 외기 온도가 30℃ 가까이 상승하는 기상 상태에서도 1200 ~ 1400 ppm의 고농도 CO₂ 농도를 유지할 수 있었다.

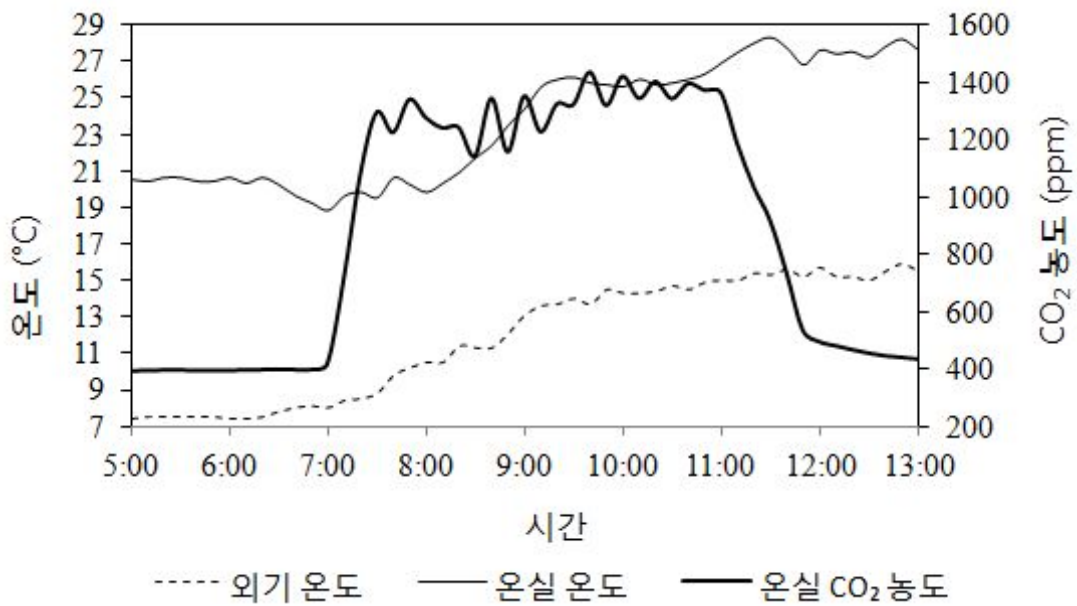


그림 111. 봄철 이산화탄소 공급 시 환경 변화 (2011년 4월 23일)

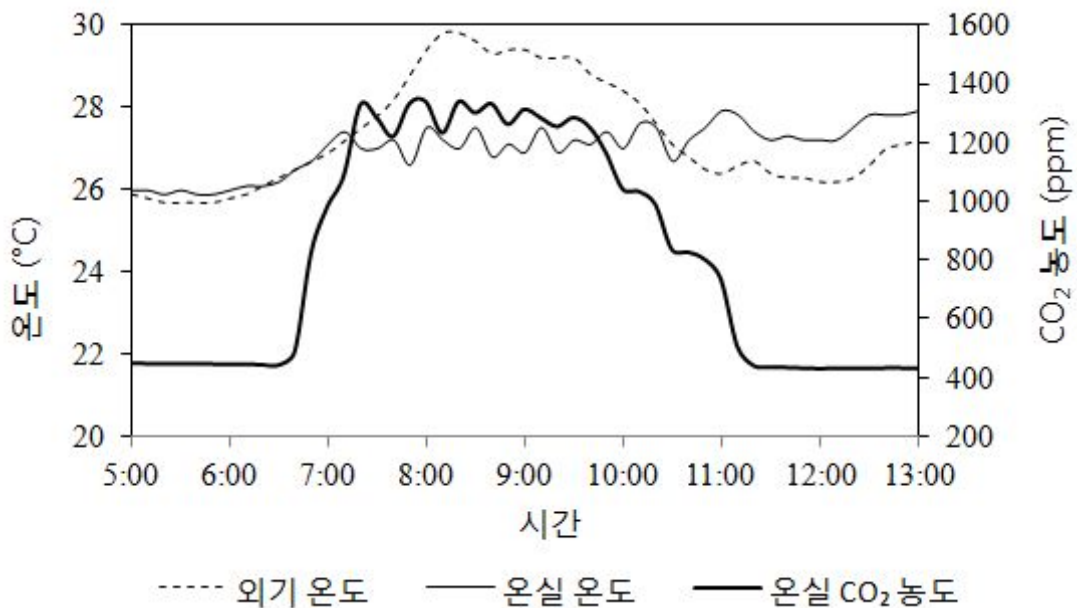


그림 112. 여름철 이산화탄소 공급 시 환경 변화 (2011년 7월 31일)

라. 고온기 이산화탄소 공급 성능 및 에너지 평가

복합 환경-에너지 관리 시스템을 활용한 고온기 이산화탄소 공급 성능 평가를 위해서 봄철인 4월과 여름철인 7월 각각 한 달간의 데이터를 취합하였다. 그림 113은 이산화탄소 공급 시간대인 오전 7시 ~ 11시의 평균 CO₂ 농도로써 1200 ~ 1300 ppm을 유지하고 있음이 확인된다. 따라서 본 시스템을 이용할 경우 고온기라고 할지라도 고농도의 이산화탄소 공급이 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

4월 17 ~ 22일의 경우 CO₂ 공급이 중지된 결과를 보여주는데 이는 LPG교체가 늦어지면서 발생한 문제로서 LPG 교환 시기를 미리 확인하여 제때에 처리해 주는 것이 지속적인 이산화탄소 공급에 중요하다는 것을 상기시켜준다.

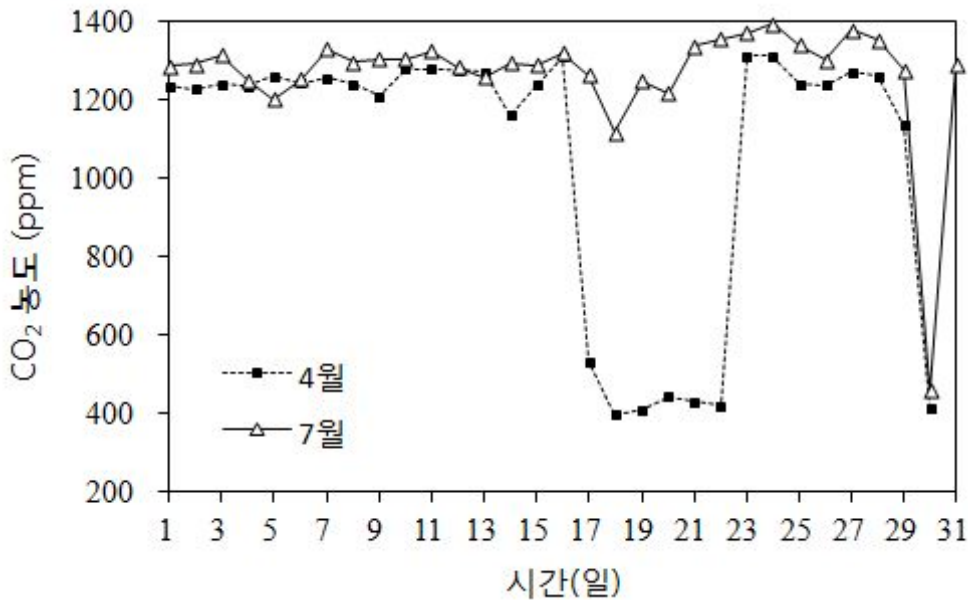


그림 113. 고온기 이산화탄소 공급 결과

고온기 이산화탄소 공급 운영에 따른 온실의 에너지 입출관계를 분석해보니 냉방 열량은 4월에서 6월까지 일 평균 43159 kcal에서 88161 kcal로 증가하다가 7월에는 38972 kcal, 8월에는 46690 kcal로 조금 줄어들었다 (그림 114). 이와 같은 결과는 6월까지의 종일 냉방 수행이 가능하였기에 외기 온도와 태양복사 에너지의 상승에 따라서 냉방 열량도 증가한 것이고, 7~8월에는 종일 냉방이 불가능 하였기에 CO₂ 공급 시간에만 집중적으로 냉방을 수행하여 오히려 냉방 용량이 줄어든 것이다. CO₂ 발생기로부터 회수된 배기가스 열에너지는 일 평균 22000 ~ 29000 kcal 로 확인되었는데 7~8월에 조금 높게 측정된 것을 확인할 수 있었다. 이 결과는 7~8월 중

에는 주변 기온이 높아서 CO₂ 발생기의 열회수 효율이 증가한 것임을 예상해 볼 수 있다. 일 평균 LPG 사용량은 4월의 2.7 kg에서 7, 8월의 1.7 kg으로 점점 줄어들고 있는데 이는 기온 상승에 의한 LPG의 밀도 변화와 CO₂공급시간 조절에 의한 LPG사용량 절감이 그 원인이라고 볼 수 있다.

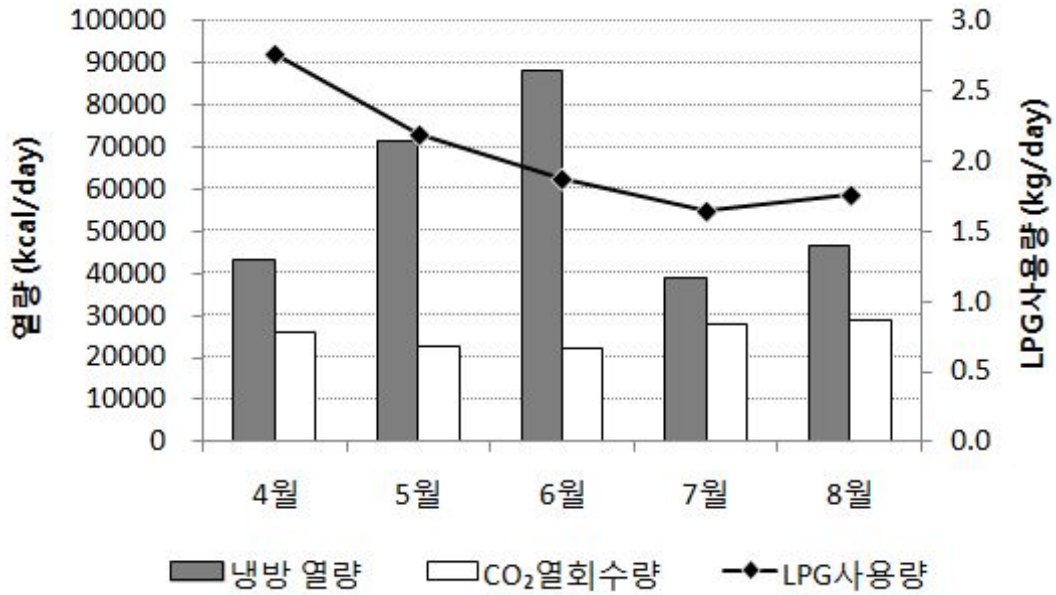


그림 114. 고온기 이산화탄소 공급 운영에 따른 온실의 에너지 입출관계

제 6 절 관행 방식 운영의 유리온실과 복합 환경-에너지 관리 온실의 에너지 및 환경비교 분석

1. 환경 제어 설비와 제어 방식 비교

개발된 복합 환경-에너지 관리 온실과 관행 방식 운영의 온실의 특징을 살펴보면 복합 환경-에너지 관리 온실은 탄산가스 공급, 공기열교환시스템, 보광시스템 등이 설치되어 운영되었고, 관행제어방식의 경우 경유 보일러 난방, CO₂무공급, 무보광, 무냉방, 타이머에 의한 환경제어를 수행하였다. 세부 설정값과 차이는 표 33에 정리한 것과 같다.

표 33. 복합 환경-에너지 관리 온실과 관행 방식 운영의 온실의 특징 비교

항목	복합 환경-에너지 관리 온실	관행 운영 온실	
설비	난방설비	FCU를 이용한 35-50℃ 고온수 순환 난방	FCU를 이용한 80-90℃ 고온수 순환 난방, 경유 보일러
	열회수 설비	FCU를 이용한 5-15℃ 저온수 순환 열회수	-
	CO ₂ 설비	LPG 연소식 탄산가스 발생기	-
	보광설비	250W 고압 나트륨등 21대	-
	양액/관수설비	저면 양액 및 관수	저면 양액 및 관수
제어	난 방	16℃ 유지	16℃ 유지
	냉 방	26℃ 이상에서 열회수	26℃ 이상에서 천창 개방
	탄산가스	7 - 11시, 1300 ppm	-
	보 광	22~05시	-

2. 온습도 환경 비교

복합 환경-에너지 관리 온실과 관행 제어 방식 온실의 환경 데이터를 맑은 날, 흐린 날, 매우 흐린 날 기준으로 비교해 보았다. 날씨의 기준은 평균운량으로 하였는데, 선정된 날씨는 맑은 날 2011년 2월 11일, 흐린 날 2011년 2월 8일, 매우 흐린 날 2011년 2월 6일이었고 각 날씨의 운량은 0.8, 4.4, 7.6 이었다. 결과는 그림 105 - 107와 같다.

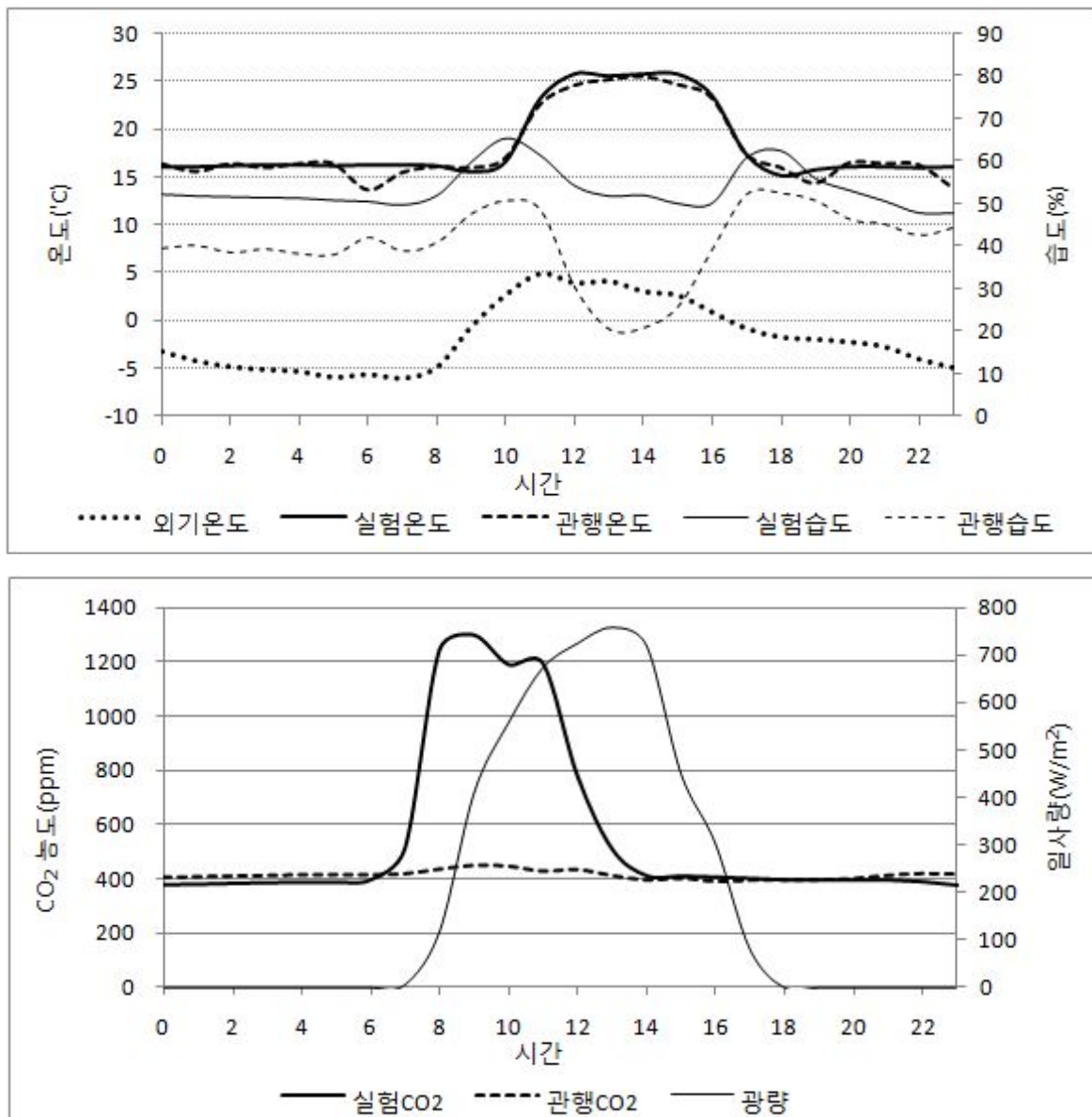


그림 115. 맑은날 실험온실과 관행온실의 환경 비교
(2011년 2월 11일, 평균운량 : 0.8)

온실 내부의 온도는 실험온실과 관행온실의 모두 야간 16°C를 유지하였고, 주간에 일사량이

증가하면서 25℃ 수준에도 온도 조절이 되고 있었다. 하지만 습도의 경우 큰 차이를 보여주었는데 실험 온실의 경우 50% 수준에서 습도가 유지되고 있었던 반면에 관행 온실의 경우 20% 까지 습도가 떨어지는 모습을 보여주었다. 이와 같은 결과는 실험 온실의 경우 온실 내부의 열 에너지만을 회수하기 때문에 습도에 영향을 주지 않은 반면에, 관행 온실의 경우 외부 공기를 유입하여 온도를 조절하기 때문에 차가운 외부 공기가 온실 내에서 온도가 높아지면서 상대습도가 급속히 낮아지는 결과가 나타났다.

CO₂ 농도의 경우 실험온실에서 8시 - 1시 사이에 1000 ppm 이상이 유지되어, 관행온실과 두드러진 차이를 보여준다.

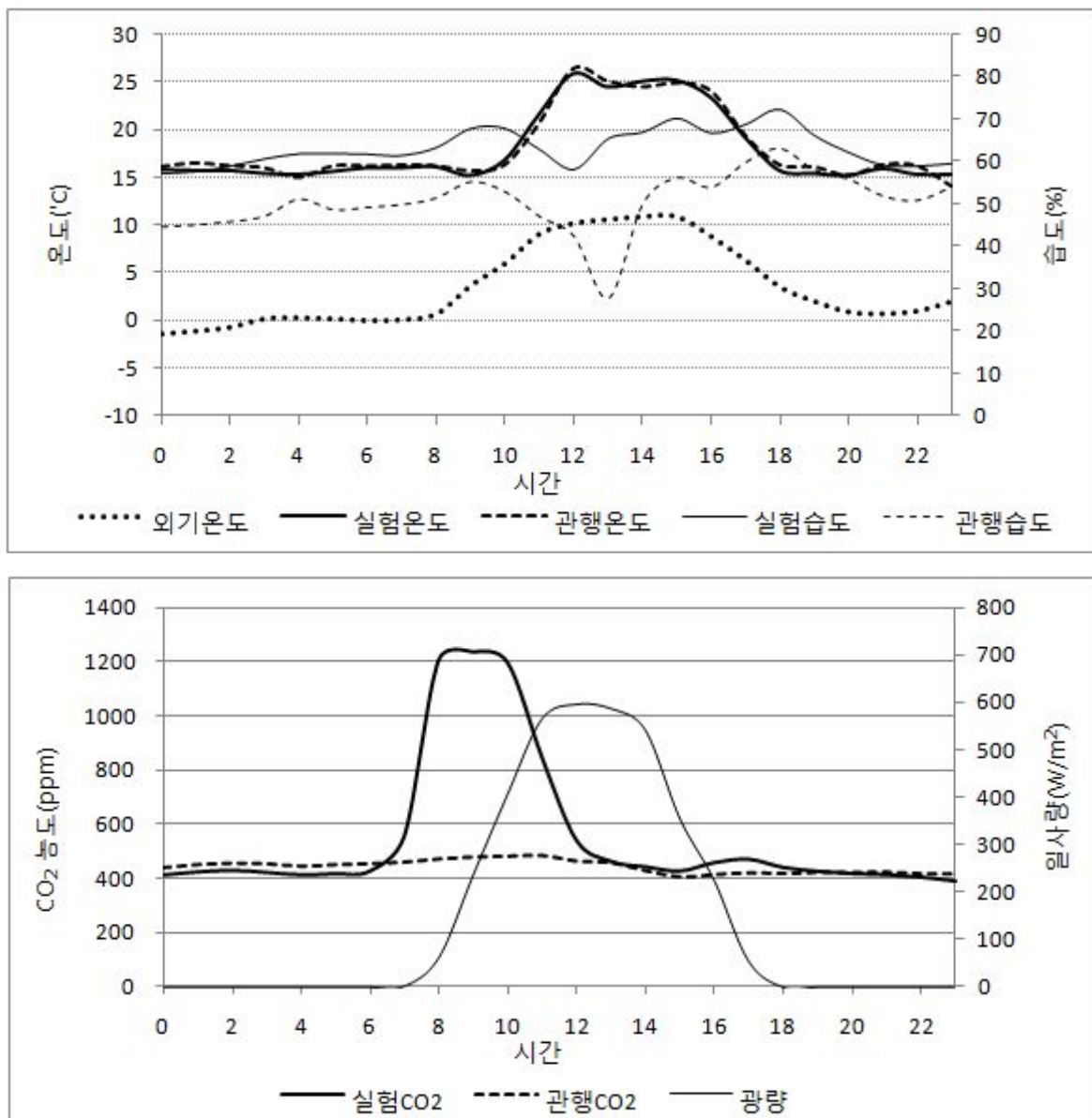


그림 116. 흐린날 실험온실과 관행온실의 환경 비교
(2011년 2월 8일, 평균운량 : 4.4)

흐린날의 경우 맑은날에 비하여 온도 조절을 위한 관행 온실의 창 개방이 짧은 시간만 발생했기 때문에 습도가 1시간 가량 30% 수준으로 떨어졌다가 다시 회복되는 모습을 보여주었다. 반면에 실험온실은 60 - 70% 수준의 높은 습도를 지속적으로 유지할 수 있었다.

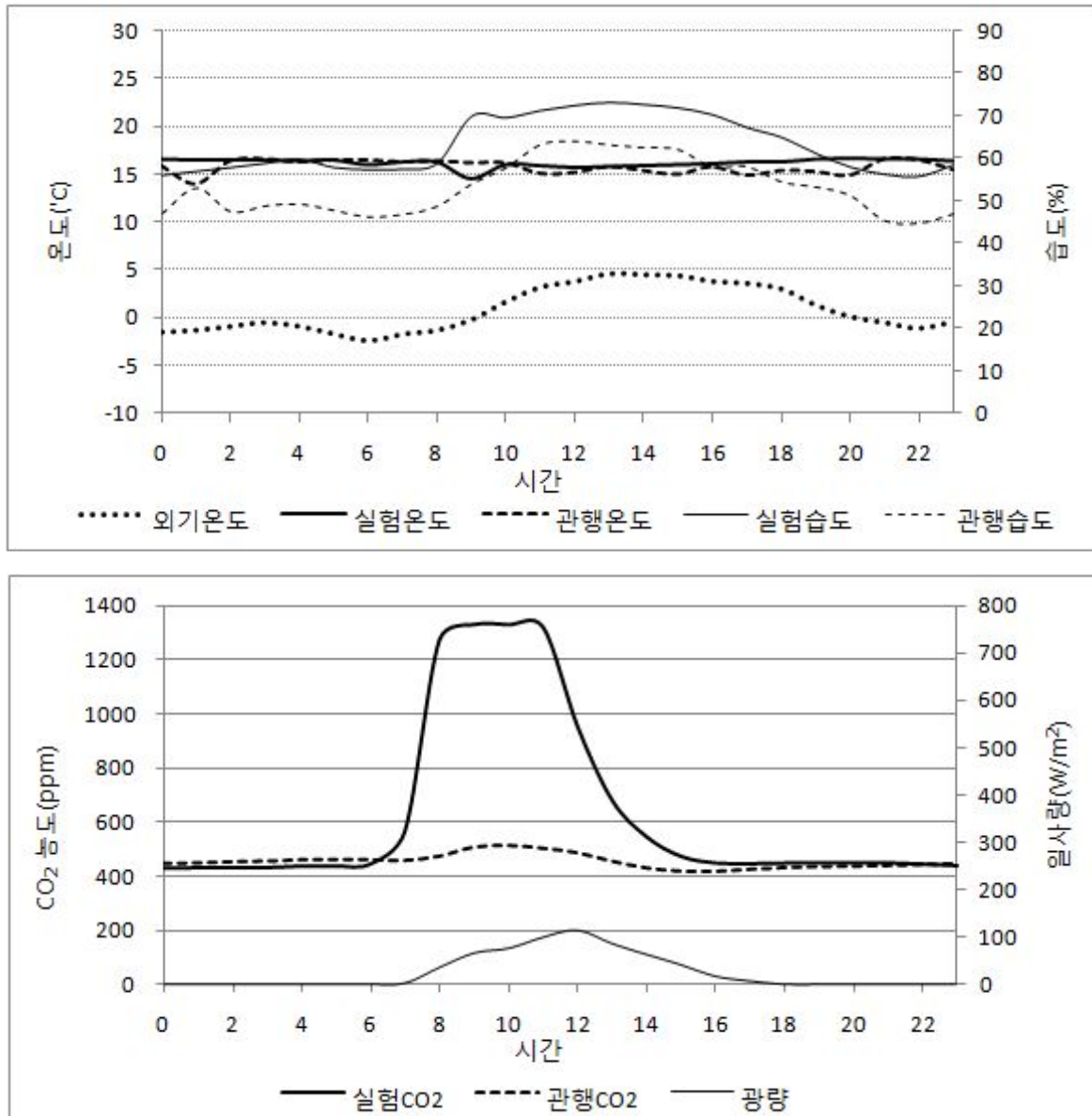


그림 117 매우 흐린날 실험온실과 관행온실의 환경 비교
(2011년 2월 6일, 평균운량 : 7.6)

매우 흐린 날의 경우 일사량이 100 W/m² 이하를 유지하면서 태양복사에 의한 열에너지 공급이 부족하였다. 따라서 온실의 온도가 난방 온도인 16°C 수준에서 하루 종일 유지되고 있음

을 확인할 수 있다. 관행 온실의 경우에도 습도의 갑작스런 하락 현상은 발견되지 않았고, 광합성이 충분히 이루어지지 않기 때문에 CO₂ 농도의 유지 시간이 길고 변동이 거의 눈에 띄지 않는다. 이날은 주간에도 난방이 지속적으로 수행되었다.

3. 창 개폐 여부에 의한 환경 비교

복합 환경-에너지 관리 온실과 관행 제어 방식 온실의 제어방식 차이에 있어서도 환경 변화가 발견되었는데 특히 고온에서 냉방을 수행할 때 관행 방식의 창 개폐를 통한 냉방으로 인하여 온도변화가 크게 나타난 것이 발견되었고 이는 작물의 스트레스로 이어질 수 있을 것으로 우려된다. 맑은날의 냉방 수행시간 동안의 자료를 살펴보면 그림 118과 같다.

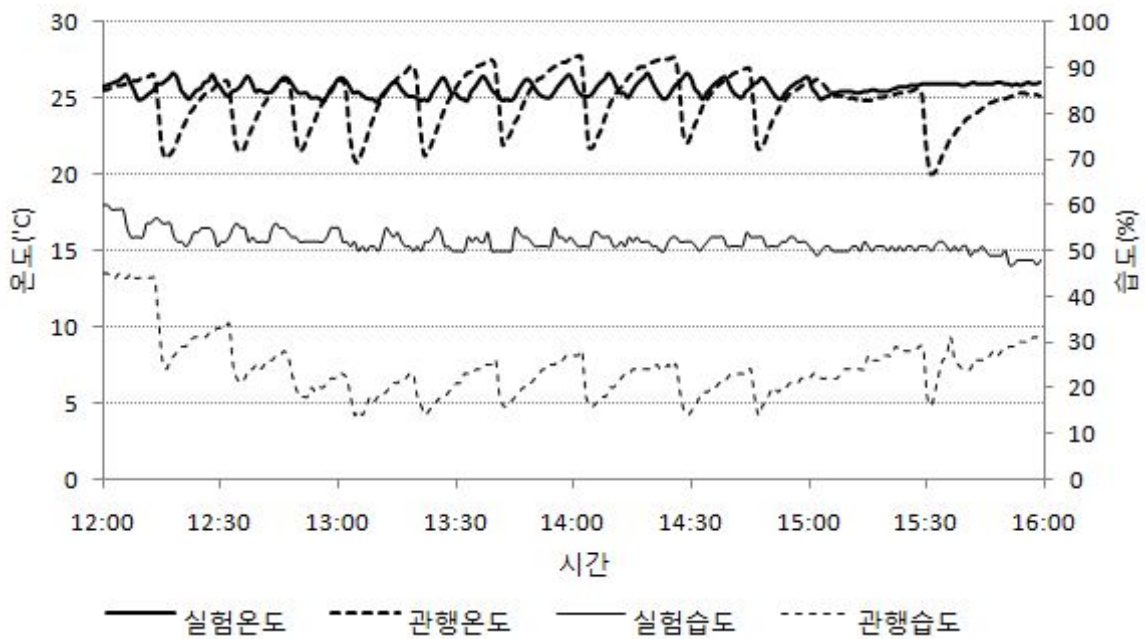


그림 118. 냉방(열회수)시 실험온실과 관행온실의 환경 변화

창 개폐를 통하여 냉방을 수행하는 관행온실의 경우 온도 변화가 5 - 6°C의 큰 변동폭으로 수행되고 있는 반면에 실험온실은 2°C 이하의 수준에서 안정적으로 온도 유지를 수행하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 관행 온실의 경우 온도와 함께 습도 역시 15% 이상의 큰 폭의 변화를 보이며 점점 낮아지는 모습을 보여 주었으나 실험 온실의 경우 5% 이내에서 안정적으로 유지되고 있었다.

제 7 절 복합 환경-에너지 관리 시스템의 경제성 평가

1. 설비 비용 평가

설비 비용의 산정은 제작 업체의 향후 영업 전략과 관련된 문제로 합리적인 제시가 아직 충분하지 못하다. 다만 연구에 소요된 비용을 기준으로 판단해 본다면(표 34) 복합 온실 환경-에너지 관리 시스템의 경우 30평 온실에 LPG연소형 탄산가스 발생기의 경우 약 10,000,000원, 히트펌프 시스템의 경우 약 15,000,000원, 유비쿼터스 에너지 통합 제어 장치의 경우 약 15,000,000원, 기타 설비(배관, 보광, FCU 등) 약 5,000,000원으로 총 45,000,000 원의 비용이 소요된 것으로 산출된다. 관행 온실의 경우 경유 보일러(33,000 kcal/hour 급) 700,000원과 기타 설비(배관, FCU 등) 약 2,000,000원으로 총 2,700,000원 정도 소요된다. 하지만 평수가 커짐에 따라 탄산가스 발생기와 유비쿼터스 에너지 통합 제어 장치의 경우 가격 변동이 거의 발생하지 않기 때문에 큰 평수에 따라 부담이 줄어드는 요소가 있다.

표 34. 설비 비용 비교 (100 m² 온실 기준)

	복합 환경-에너지 관리 시스템	경유 보일러 난방
설비비	<ul style="list-style-type: none"> • LPG연소형 CO₂ 발생기 : 10 백만원 • 히트펌프 시스템 : 15 백만원 • 에너지 통합 제어 시스템 : 15 백만원 • 기타 설비 : 5 백만원 	<ul style="list-style-type: none"> • 경유 보일러 : 0.7 백만원 • 기타 설비 : 2 백만원
합계	45,000,000 원	2,700,000 원

2. 운영 비용 평가

난방이 시작된 2010년 11월부터 2011년 1월까지 약 9일간의 운영 비용 비교를 수행하였다. 11월의 경우 난방 일수가 많지 않아서 8일 간의 데이터를 비교하였다. 전기요금의 경우 보광의 경우 농사용 을을 적용하여 26.3 원/kWh, 그 외의 전기요금은 농사용 병을 적용하여 36.4 원/kWh, 경유의 경우 면세유 가격을 적용하여 869원/L, LPG의 경우 소비자 가격인 1900 원/kg 을 적용하여 산출하였다. 본 연구에서 추구하는 하이브리드 히트펌프 시스템의 경우 보조 열원으로 지하수의 공급이 필요한데, 경기도 농업기술원의 경우 지하수를 공급받을 수 없는 시설 환경이기 때문에 지하수를 대신하여 전기히터를 이용하여 가상 지하수를 구현하였다. 지하수의 온도가 14 - 16℃ 정도로 가정하고, 저온수 탱크 온도가 그 이하로 떨어지면 지하수를 공급한

다는 가정으로 전기히터를 가동하였다. 따라서 보조 열원에 대한 전기 사용량은 전기히터 사용량이 아닌 750W급 물펌프(유량 80L/min)로 가정하여 산정하였다.

다음의 표 35 ~ 37에서 보는 것과 같이 복합 온실 환경-에너지 관리 시스템을 활용할 경우 가을철에 해당하는 11월에는 62 - 67%의 에너지 절감이, 겨울에 해당하는 12월과 1월에는 각각 9 - 62%, 44 - 71% 에너지 절감 효과가 있는 것으로 평가 되었다. 이 때 경유의 가격이 상승한다거나 면세율이 낮아지게 되면 에너지 절감율은 더 높아져 본 시스템의 경제적 타당성이 더 높아질 것으로 판단된다.

표 35. 2010년 11월의 운영 비용 비교

날짜	관행 온실					복합 환경-에너지 관리 온실					절감율 (%)
	전기		경유		비용	전기		LPG		비용	
	사용량 (kWh)	요금 (원)	사용량 (L)	요금 (원)	합계 (원)	사용량 (kWh)	요금 (원)	사용량 (kg)	비용 (원)	합계 (원)	
23	8.4	306	21.2	18183	18489	85.0	2616	2.16	4104	6720	63.7
24	6.9	251	16.2	13916	14167	62.5	1797	1.63	3097	4894	65.5
25	8.5	309	18.4	15771	16081	81.8	2508	1.90	3610	6118	62.0
26	10.5	382	22.0	18925	19308	85.8	2651	2.10	3990	6641	65.6
29*	31.8	1158	64.2	55107	56264	240.7	7318	5.71	10849	18167	67.7
30	7.5	273	15.8	13545	13818	70.6	2094	1.57	2983	5077	63.3

(* 29일은 27, 28, 29일 사용량이 합산된 것임)

표 36. 2010년 12월의 운영 비용 비교

날짜	관행 온실					복합 환경-에너지 관리 온실					절감율 (%)
	전기		경유		비용 (합계 (원))	전기		LPG		비용 (합계 (원))	
	사용량 (kWh)	요금 (원)	사용량 (L)	요금 (원)		사용량 (kWh)	요금 (원)	사용량 (kg)	비용 (원)		
20	9.7	353	11.0	9483	9836	136.8	4386	2.39	4541	8927	9.2
21	3.8	138	16.8	14431	14570	102.4	3277	2.67	5073	8350	42.7
22	3.9	142	16.8	14431	14573	104.2	3330	2.82	5358	8688	40.4
23	3.4	124	14.4	12370	12493	110.9	3584	2.79	5301	8885	28.9
24	8.0	291	37.4	32161	32452	185.5	6314	3.10	5890	12204	62.4
28	4.7	171	20.6	17730	17901	159.8	5300	2.35	4465	9765	45.4
29	6.2	226	28.8	24739	24965	147.7	4954	3.00	5700	10654	57.3
30	4.3	157	14.4	12370	12526	143.4	4622	2.84	5396	10018	20.0
31	7.9	288	28.3	24327	24614	170.7	5769	2.73	5187	10956	55.5

표 37. 2011년 1월의 운영 비용 비교

날짜	관행 온실					복합 환경-에너지 관리 온실					절감율 (%)
	전기		경유		비용 (합계 (원))	전기		LPG		비용 (합계 (원))	
	사용량 (kWh)	요금 (원)	사용량 (L)	요금 (원)		사용량 (kWh)	요금 (원)	사용량 (kg)	비용 (원)		
11	6.4	233	23.0	19791	20024	151.3	5084	3.14	5966	11050	44.8
12	7.4	269	29.8	25564	25833	151.3	4950	2.28	4332	9282	64.1
13	7.7	280	36.5	31336	31617	160.5	5405	3.18	6042	11447	63.8
14	5.9	215	28.8	24739	24954	137.1	4547	3.02	5738	10285	58.8
17*	25.9	943	109.0	93597	94539	536.6	18322	9.42	17898	36220	61.7
18	7.5	273	27.8	23915	24188	146.7	5230	3.04	5776	11006	54.5
19	6.5	237	25.4	21853	22090	168.5	5630	3.04	5776	11406	48.4
20	6.9	251	27.4	23502	23753	156.0	5232	2.94	5586	10818	54.5
21	7.0	255	45.6	39170	39425	164.0	5526	3.06	5814	11340	71.2

(* 17일은 15, 16, 17일 사용량이 합산된 것임)

3. 고온기 이산화탄소 공급의 경제성

연소식 CO₂ 발생기를 통한 이산화탄소 공급은 순수 CO₂ 분배를 이용하는 것에 비해 더 경제적인 것으로 알려져 있다. 하지만 장치 비용, 온실의 온도 상승 문제, 제어의 어려움 등의 단점들이 있다. 본 연구에서 개발한 시스템의 경우 기존의 연소식 CO₂ 발생기의 문제들을 기술적으로 해결하였다. 또한 고온기에도 냉방과 병행하여 이산화탄소 공급을 수행할 수도 있음을 보였다. 하지만 고온기에 시스템을 운영하기 위해서는 CO₂의 원료가 되는 LPG 비용뿐만 아니라, 냉방 및 열회수를 수행할 때 필요한 전기 비용이 추가된다. 냉방 및 열회수에 소요되는 장치로는 FCU, 순환펌프, 히트펌프 시스템이 있다. 이와 같은 비용을 실험을 통하여 확인한 결과 2011년 7월은 그림 119와 같고, 2011년 8월은 그림 120과 같다. 전기요금은 농사용 병 (36.4 원/kWh)을 기준으로, LPG비용은 1900원/kg을 기준으로 산출되었다.

그림에서 흰색 바 부분이 LPG 비용이고 이 비용은 2000원 ~ 4000원 수준에서 변한다. 회색 바 부분은 전기비용을 나타내는데 이 비용은 냉방 가동 수준 여부에 따라서 가격 변동성이 크다. 7월의 경우 756원 ~ 4648원으로 최소비용과 최대비용 사이에 6배 이상 차이가 발생하였다. 8월의 경우 1657원 ~ 4628원으로 7월에 비하여 최대비용은 비슷하였으나, 최소비용은 증가하였다. 이는 8월의 기온이 전반적으로 높기 때문에 발생한 것으로 보인다.

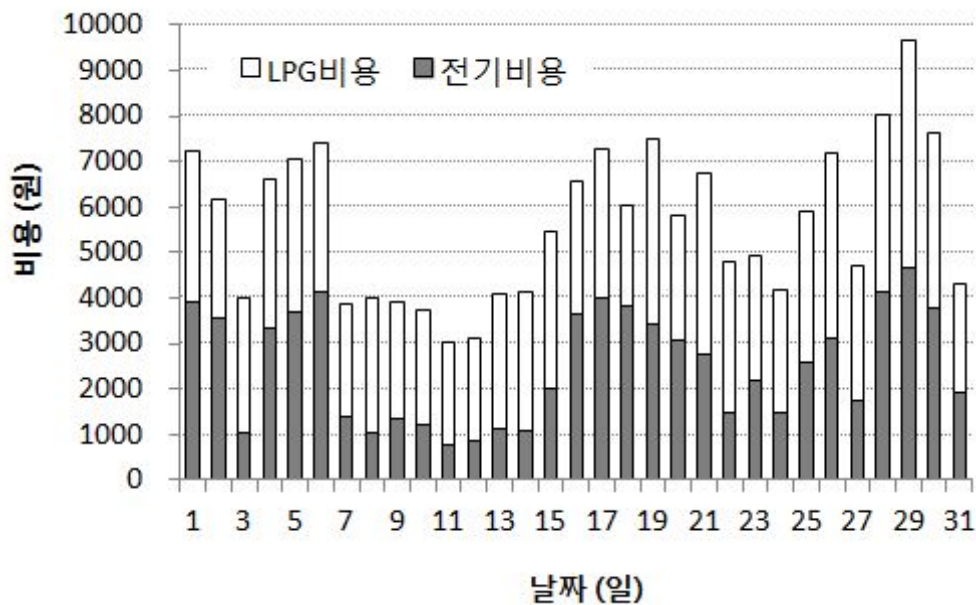


그림 119. 고온기 이산화탄소 공급 소요 비용 (2011년 7월)

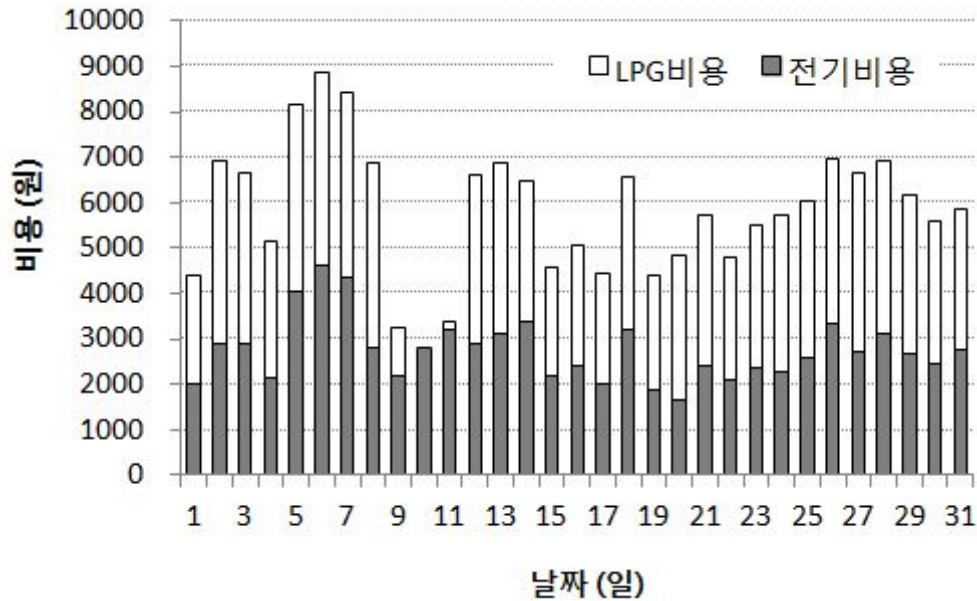


그림 120. 고온기 이산화탄소 공급 소요 비용 (2011년 8월)

이산화탄소 공급을 수행하는데 필요한 총 비용은 7월의 경우 평균 5691원, 8월의 경우 일일 평균 5825원으로 평가된다. 만약에 순수 CO₂ 봄베를 이용하여 냉방 없이 이산화탄소를 공급하려는 경우에 1일 40L 봄베 1통(20,000원)을 쓴다고 할 때 소요 비용은 4배 가까이 비싸고, 환기 상태에서 이산화탄소 공급이 이루어지기 때문에 CO₂ 농도는 700 ~ 800 ppm 수준까지밖에 유지 되지 못할 것이다. 따라서 본 시스템을 이용한 이산화탄소 공급 운영은 기존의 봄베 방식 대비 매우 경제성이 높은 것으로 판단된다.

4. 지열 이용 온실과의 비교를 통한 경제성 평가

2010년부터 보급되기 시작한 지열 히트펌프 난방 시스템을 설치한 온실과 본 연구에서 개발한 복합 환경-에너지 관리 온실의 운영 결과를 비교 평가 해보았다. 또한 경유 보일러 난방 방식의 관행 온실의 경우도 포함하였다. 비록 지열 히트펌프 난방 시스템도 도입 초기 단계라 정확한 데이터를 확보하지는 못하였으나 농가를 직접 방문하여 획득한 정보를 바탕으로 비교 평가를 실시하였다. 분석 기간은 2010년 11월부터 2011년 2월까지 4개월간 이고 그 결과는 다음의 표들에서 확인된다.

비교 평가 결과 온실 면적 0.1ha 당 겨울철 4개월간의 운영 비용은 복합 환경-에너지 관리 온실의 경우 약 850만원, 지열 활용 온실의 경우 220 ~ 540만원, 관행 온실의 경우 약 1330만원이 소요되었다. 하지만 지열 히트펌프 시스템의 설비비는 매우 고가이기 때문에 기계의 감가 상각을 포함하여 비용을 산출해보면 복합 환경-에너지 관리 온실의 경우 약 1100만원, 지열 온

실의 경우 810 ~ 1300 만원, 관행 온실의 경우 1830만원이 소요되는 것으로 분석된다. 결국 복합 환경-에너지 관리 온실의 비용과 지열 활용 온실의 비용은 크게 차이나지 않는 것을 확인되었다. 다만 복합 환경-에너지 관리 온실의 경우 기상조건에 따라서, 그리고 재배 작물의 생육 조건에 따라서 비용 절감 효과가 크게 변할 수 있기 때문에 적합한 조건에서 복합 환경-에너지 관리 시스템을 활용한 다면 최상의 에너지 비용 절감 효과를 기대할 수 있을 것이다.

가. 비교 온실별 시설 내역 비교

	복합 환경-에너지 관리 온실	지열 히트펌프 적용 온실(가평)	지열 히트펌프 적용 온실(용인)	지열 히트펌프 적용 온실(이천)	관행 온실 (경유보일러)
시설비용	0.15 억원	7.5 억원	10.0 억원	5.0 억원	0.03 억원
시설면적	100 m ²	5,000 m ²	10,000 m ²	3,300 m ²	100 m ²
온실설비	유리온실, 1겹 보온스크린	비닐온실, 2겹 보온커튼	외부 유리온실 + 내부 비닐온실	외부 유리온실 + 내부 비닐온실, 1겹 보온스크린	유리온실, 1겹 보온스크린
환경제어	난방, 보광, CO ₂	난방	난방	난방, 보광	난방
주 난방기	히트펌프(6RT) : 1대	히트펌프(50RT) : 3대	히트펌프(50RT) : 3대	히트펌프(50RT) : 2대	경유보일러
축열탱크	고온수 5 톤, 저온수 10톤	고온수 75 톤, 저온수 75 톤	고온수 150 톤, 폐열 30 톤	고온수 52 톤	-
보조열원	전기히터	경유보일러	경유보일러	경유보일러	-

나. 에너지 사용량의 절대 수치 비교

	복합 환경-에너지 관리 온실	지열 히트펌프 적용 온실(가평)	지열 히트펌프 적용 온실(용인)	지열 히트펌프 적용 온실(이천)	관행 온실 (경유보일러)
시설비용	0.15 억원	7.5 억원	10.0 억원	5.0 억원	0.03 억원
시설면적	100 m ²	5,000 m ²	10,000 m ²	3,300 m ²	100 m ²
전기사용량	11,048 kWh	147,051 kWh	439,560 kWh	105,204 kWh	723.8 kWh
보조난방	전기: 10,087 kWh	경유: 47,250 L	경유: 20,800 L	경유: 2,000 L	경유: 2,669 L
LPG사용량	375 kg	-	-	-	-
공급열량	18,176 Mcal	719,582 Mcal	1,283,825 Mcal	320,177 Mcal	19,217 Mcal
난방 외 환경제어	보광, CO ₂	-	-	보광	-

* 복합 환경-에너지 관리 온실의 LPG는 CO₂ 공급을 위한 것임

다. 난방 조건을 동일하게 환산시 비교 (면적 0.1h, 총 공급열량 100,000 Mcal, 겨울철 4개월)

	복합 환경-에너지 관리 온실	지열 히트펌프 적용 온실(가평)	지열 히트펌프 적용 온실(용인)	지열 히트펌프 적용 온실(이천)	관행 온실 (경유보일러)
시설비용	0.6 억원	1.5 억원	1.0 억원	1.5 억원	0.1 억원
추가시설비용 (보광, CO ₂)	0 원	보광 : 0.3 억원 CO ₂ : 0.12 억원	보광 : 0.3 억원 CO ₂ : 0.12 억원	보광 : 0.3 억원 CO ₂ : 0.12 억원	0 원
시설비 합계	0.6 억원	1.92 억원	1.42 억원	1.92 억원	0.1 억원
전기사용량 / 비용	60,783 kWh / 2,210,000 원	20,442 kWh / 744,000 원	34,238 kWh / 1,246,000 원	32,858 kWh / 900,000 원	3,766 kWh / 140,000 원
보광용 전기사용량	상기 전력량에 합산 되어있음	38,400 kWh / 1,010,000 원	38,400 kWh / 1,010,000 원	38,400 kWh / 1,010,000 원	0 kWh / 0 원
경유사용량 / 비용	6,629 L / 6,300,000 원	3,866 L / 3,673,000 원	0 L / 0 원	624 L / 593,000 원	13,889 L / 13,190,000 원
운영비용 합계	8,510,000 원	5,427,000 원	2,256,000 원	2,503,000 원	13,330,000 원
총 비용 (기계 감가상각 포함)	11,010,000 원	13,427,000 원	8,173,000 원	10,503,000 원	18,330,000 원

* 보조난방은 모두 경유로 환산, 경유비용은 면세유 (950원/L) 적용

* 보광에 의한 난방 효과는 보광 소비전력의 60%로 계산. 이는 경유 2,700 L 해당하는 열량으로 경유사용량에 차감 반영함

* CO₂ 공급관련 비용은 시설비만 적용하고, 운영비용은 모든 경우에 동일하게 포함하지 않음

* 히트펌프 시스템은 내용연수 8년, 관행은 5년 적용 - 통계청(2009) 온실난방용대체에너지화기기 내용연수 적용

제 8 절 현장 평가

1. 현장 평가 온실의 현황 및 설비 구조

현장 평가 온실은 경기도 화성시 우정읍 운평리 소재한 아치형 다동 비닐온실로써 총 면적이 약 5000 m² 정도이다. 비닐온실 중 1000 m² 규모의 실험 구역을 2군대 선정하여 각각 실험군과 대조군으로 사용하였다. 현장 온실의 형태와 실험구역, 기계실 등의 위치는 다음 그림 121 과 같고 실험 구역 내 온실 사진은 그림 122과 같다.

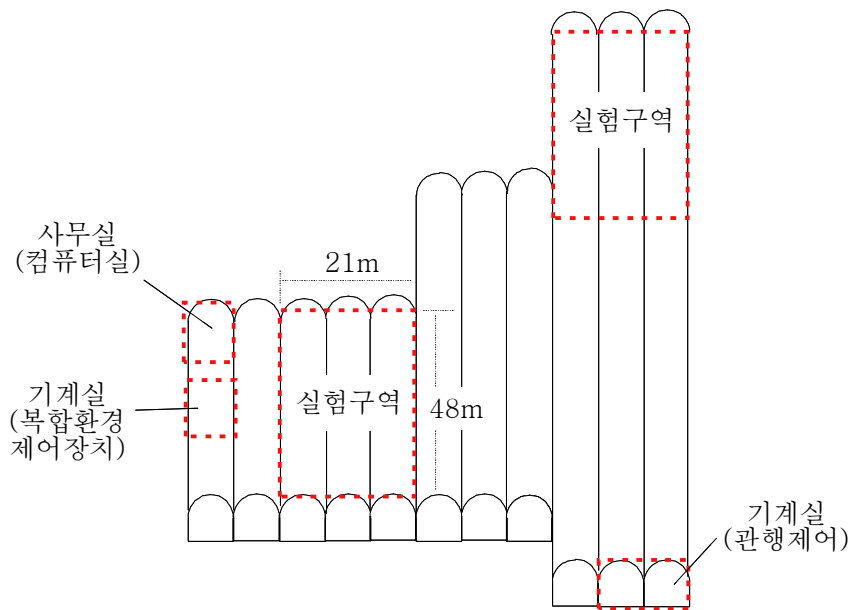


그림 121. 현장 평가 온실의 형태와 설비 위치



그림 122. 현장 평가 실험 온실 내부 전경

현장 평가 온실은 심비디움을 재배하는 온실로써 실험 작물로도 심비디움을 선정하여 작물 생육 평가에 활용하였다.

2. 현장 평가용 개별 장치 개발 및 시스템 구성

가. 에너지 통합 제어 시스템

에너지 통합 제어 시스템은 온실의 열회수, 냉난방, 이산화탄소 공급 및 히트펌프 시스템과 연계된 제어를 수행하는 것으로 마이크로프로세서를 이용한 제어 회로, 전기 설비, 제어용 서버로 구성된다. 전반적인 작동 방식은 기술 개발에서 제시한 내용과 동일하다.

아래 그림 123는 에너지 통합 제어 시스템의 제어박스 외부와 내부의 모습이다. 본 제어 박스로부터 순환펌프, FCU, 상단팬, 3방 밸브 및 에너지량 계측이 수행된다.



(a) 외부

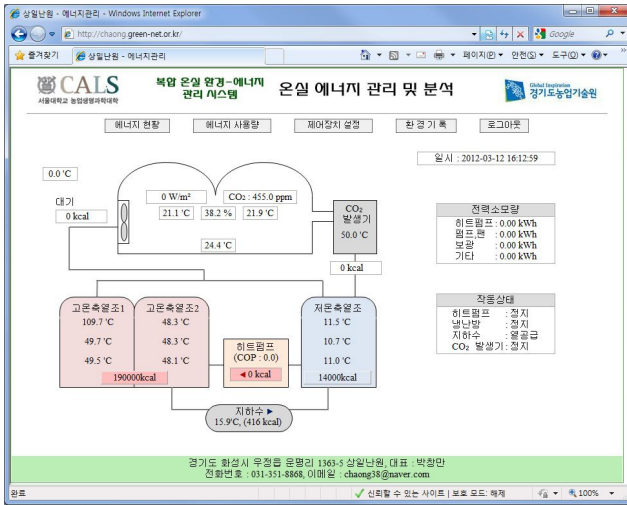


(b) 내부

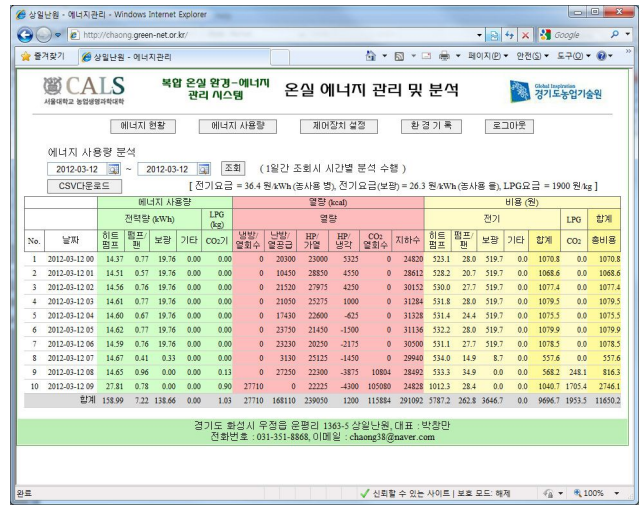
그림 123. 에너지 통합 제어 시스템의 제어박스

에너지 통합 제어의 명령 및 설정값 입력·변경은 컴퓨터 프로그램을 통하여 수행된다 (그림 124 (c)). 또한 컴퓨터 프로그램에서 수행할 수 있는 기능은 실시간 에너지 사용량 및 장치 작동 상태 모니터링 기능 (그림 124 (a)), 환경 기록 및 조회 기능 (그림 124 (d)), 누적 에너지 사용량 조회 및 비용 산출 조회 (그림 124 (b)) 등이 있다. 이 프로그램은 웹 기반으로 개발되어

제어용 서버가 인터넷에 연결되면 원격에서 자유롭게 이용할 수 있다.



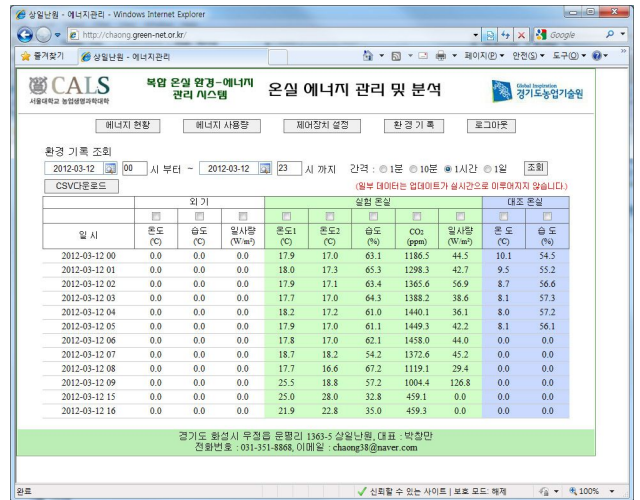
(a) 실시간 에너지-환경 모니터링



(b) 에너지 사용량 및 비용 조회



(c) 제어 설정값 확인 및 변경



(d) 환경 기록 조회

그림 124. 에너지 통합 제어 프로그램 화면

제어용 서버는 노트북으로 구현되었는데 (그림 125) 이것은 정전에 대비하기 위한 것이다. 기존 데스크탑 컴퓨터의 경우 정전이 발생한 경우 꺼지고 다시 켜주는 작업을 하기 전에는 재가동이 불가능 하였으나 노트북의 경우 정전이 발생하더라도 2 ~ 3 시간 동안은 배터리 전원으로 운영될 수 있기 때문에 안정적인 에너지 통합 제어 시스템을 구현할 수 있게 된다.



그림 125. 노트북을 이용한 제어용 서버 구축

나. 에너지 통합 제어 시스템의 통신 프로그램과 제어 명령

통신 프로그램은 제어박스과 제어용 서버와의 데이터 통신을 위한 것으로 장치의 상태, 환경 데이터, 제어 설정값들을 이 프로그램을 통하여 주고받게 된다. 프로그램은 다음 그림 126와 같다.

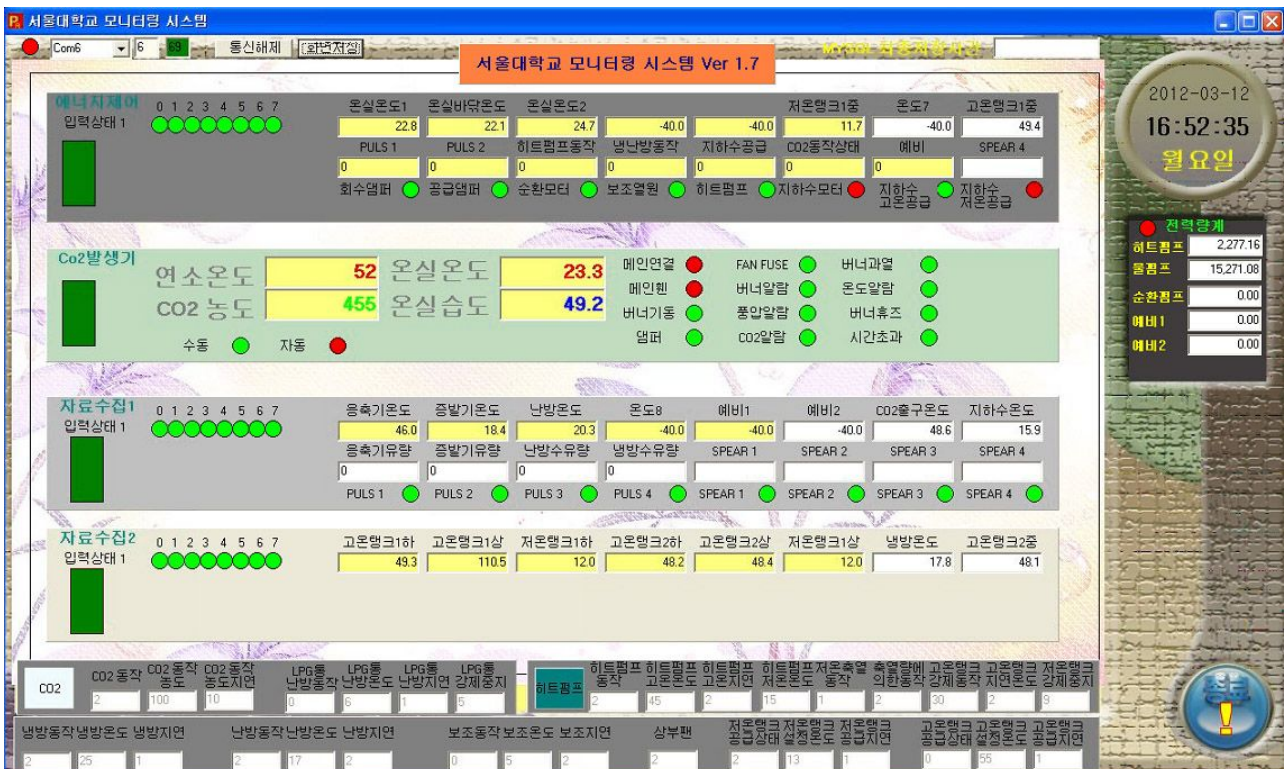


그림 126. 통신 프로그램 화면

에너지 통합 제어 알고리즘은 서버 컴퓨터에 백그라운드에서 항상 작동하는 데몬 쓰레드 (daemon thread) 프로그램으로 구현 되었고 그 실행 중인 화면은 다음 그림 127과 같다.

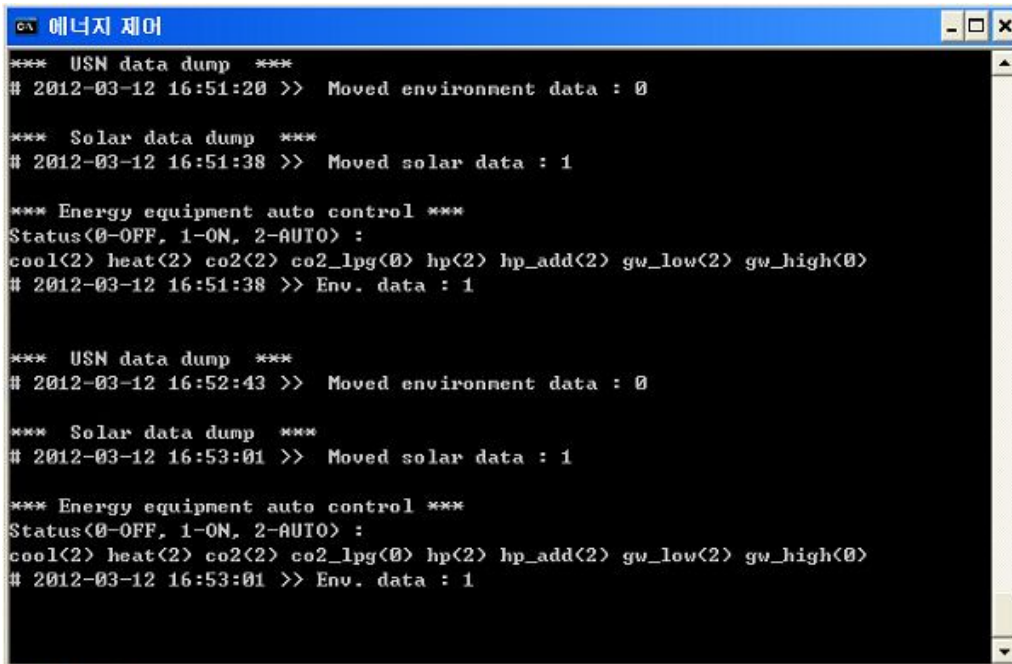


그림 127. 에너지 통합 제어 알고리즘을 구현한 데몬 프로그램

제어 명령은 데이터베이스를 통하여 수행된다(제 5 절 참고). 현장 평가용 에너지 통합 제어 시스템의 경우 다음의 표 41와 같은 제어 명령값과 수행 내용을 규정 하였다. 제어 구분은 냉방(열회수), 난방, 보조 열원, 상부팬, 저온축열조 지하수 공급(보조 열원), 고온축열조 지하수 공급(냉각), CO₂ 발생기 및 LPG통 가열, 히트펌프로 나눈어진다.

히트펌프의 경우 명령은 이전과 동일하게 하지만, 실질적인 제어는 ON/OFF 신호만 히트펌프 쪽으로 보내주는 것으로써 수행된다. 이렇게 에너지 통합 제어부와 히트펌프 시스템을 독립 제어하게 됨으로써 한쪽에 문제가 발생할 경우 다른 한쪽은 정상적인 운영을 수행할 수 있게 된다. 하지만 독립적인 제어를 위해서 고온, 저온 축열조의 온도를 에너지 통합 제어시스템과 히트펌프가 중복 계측하게 된다.

히트펌프에 새로 생긴 제어 변수(hp_add_*)가 있는데 이 변수는 겨울철에 저온 축열조의 축열량 조절을 위해서 추가로 이용하는 변수이다. 예를 들어 겨울철에 고온 축열조 히트펌프 제어 온도 45℃, 지연 온도 2℃, 저온 축열조 히트펌프 제어 온도 15℃, 지연 온도 2℃로 설정하고, hp_add_high_st=30℃, hp_add_high_gp=2℃, hp_add_low_min=10℃ 로 설정할 경우 난방을 수행하면서 고온 축열조 온도가 30℃까지 떨어지면 히트펌프를 가동한다. 그리고 고온 축열조 온도가 32℃까지 상승하면 다시 정지를 하게 된다. 이 때 저온탱크 온도가 15℃에서 점점 떨어지게 되는데 10℃까지 떨어지면 히트펌프 작동은 완전 중지된다. hp_add_status값에 0이

들어가면 이 기능을 이용하지 않는다는 의미이다.

표 41. 에너지 통합 제어 시스템의 제어 명령

구분	필드명	값	설 명
냉방	cool_status	0, 1, 2	0:정지, 1:작동, 2:자동
	cool_temp_st	온실 온도값	설정 온도 이상에서 냉방용 펌프, 팬 작동
	cool_temp_gp	온실 온도값	해당 온도 이하에서 냉방 정지 (테드존)
난방	heat_status	0, 1, 2	0:정지, 1:작동, 2:자동
	heat_temp_st	온실 온도값	설정 온도 이하에서 난방용 펌프, 팬 작동
	heat_temp_gp	온실 온도값	해당 온도 이상에서 난방 정지 (테드존)
보조 열원	hsub_status	0, 1, 2	0:정지, 1:작동, 2:자동
	hsub_temp_st	고온탱크 온도	설정 온도 이하에서 보조열원 작동
	hsub_temp_gp	고온탱크 온도	해당 온도 이상에서 보조열원 정지 (테드존)
상부팬	ufan_status	0, 1, 2	0:정지, 1:작동, 2:자동 (자동시 냉방과 동시작동)
저온 축열조 지하수 보충	ltank_status	0, 1, 2	0:정지, 1:작동, 2:자동
	ltank_temp_st	고온탱크 온도	설정 온도 이하에서 지하수를 저온탱크에 공급
	ltank_temp_gp	고온탱크 온도	해당 온도 이상에서 지하수공급 정지 (테드존)
고온 축열조 지하수 보충	htank_status	0, 1, 2	0:정지, 1:작동, 2:자동
	htank_temp_st	저온탱크 온도	설정 온도 이상에서 지하수를 고온탱크에 공급
	htank_temp_gp	저온탱크 온도	해당 온도 이하에서 지하수공급 정지 (테드존)
CO ₂ 발생기 및 LPG통 가열	co2_status	0, 1, 2	0:정지, 1:작동, 2:자동 (CO ₂ 기 작동)
	co2_conc_st	온실 농도	설정 농도 이하에서 CO ₂ 공급
	co2_conc_gp	온실 농도	해당 농도 이상에서 CO ₂ 공급 정지 (테드존)
LPG통 가열	lpg_status	0, 1, 2	0:정지, 1:작동, 2:자동 (LPG통 가열 작동)
	lpg_temp_st	LPG통 온도	설정 온도 이하에서 LPG통 가열
	lpg_temp_gp	LPG통 온도	설정 온도 이상에서 LPG통 가열정지 (테드존)
히트 펌프	lpg_lowest	LPG통 온도	설정 온도 이하에서 CO ₂ 공급 강제 중지
	hp_status	0, 1, 2	0:정지, 1:작동, 2:자동
	hp_high_st	고온탱크 온도	설정온도 이하에서 히트펌프 가동
	hp_high_gap	고온탱크 온도	설정온도 이상에서 히트펌프 가동정지(테드존)
	hp_low_st	저온탱크 온도	설정온도 이상에서 히트펌프 가동
	hp_low_gap	저온탱크 온도	설정온도 이하에서 히트펌프 가동정지(테드존)
	hp_add_status	0, 2	0:정지, 2:자동
	hp_add_high_st	고온탱크 온도	설정온도 이하에서 히트펌프 강제 작동
	hp_add_high_gap	고온탱크 온도	설정온도 이상에서 히트펌프 강제작동 중지(테드존)
hp_add_low_min	저온탱크 온도	설정온도 이하에서 히트펌프 최종 강제 중지	

다. 히트펌프 시스템

현장 평가용 히트펌프는 6.5 kW 급 히트펌프 2대를 병렬로 연결한 구조로 제작하였다. 이와 같은 구조를 통하여 개별 관리 및 수리가 용의하고 한쪽이 고장 났을 경우 남은 부분을 이용하여 비상 운전을 수행할 수 있다. 따라서 구성된 히트펌프의 설계도와 제작된 히트펌프 사진은 다음 그림 128, 129와 같다.

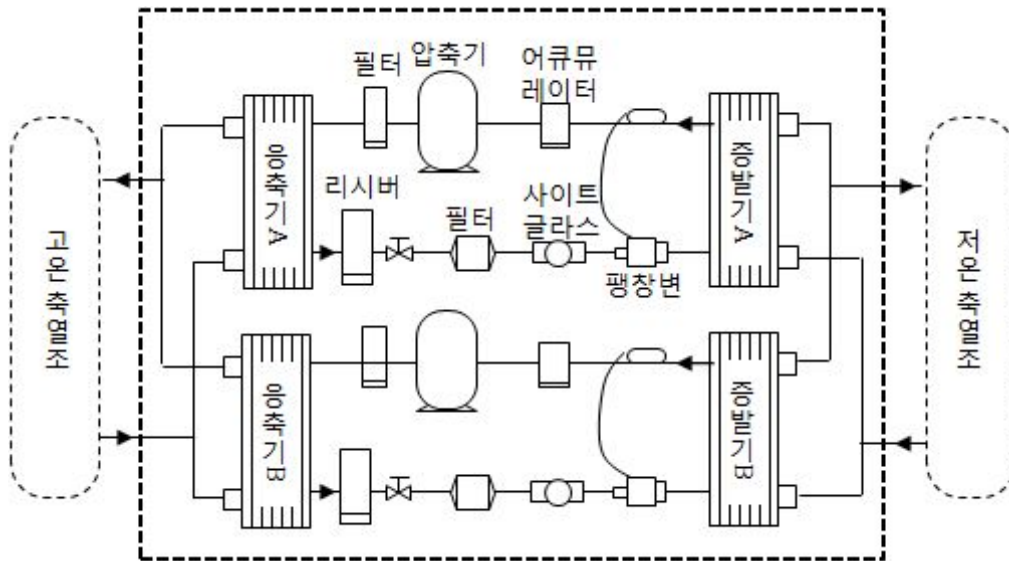


그림 128. 현장 평가용 히트펌프 설계도



(a) 히트펌프 내부



(b) 히트펌프 제어기

그림 129. 현장 평가용 히트펌프 제작

라. 통합 배관 장치 개발

축열조를 포함하는 하이브리드 히트펌프 시스템을 이용한 냉난방 장치는 매우 복잡한 배관 구조를 갖게 된다. 또한 히트펌프용 순환펌프를 비롯하여 냉난방용, 지하수용 펌프들도 구성해야하고, 열교환기의 보호를 위해서 필터 장착도 필요하다. 따라서 이와 같은 복잡한 배관 구조를 하나의 유닛으로 개발할 수 있는 가능성을 확인해 보고자 본 연구에서는 통합 배관 장치를 개발하였다. 통합 배관 장치는 그림 130에서 보는 것과 같이 히트펌프와 축열조, 냉난방 장치와 축열조, 지하수와 축열조를 연결시켜 주는 구조로 설계되었다.

3방 밸브의 선택에 따라 온실의 FCU로 순환하는 물이 저온 축열조에서 공급되는지 고온 축열조에서 공급되는지가 결정된다. 열회수(냉방)를 수행할 때는 저온 축열조, 열공급(난방)이 수행될 때는 고온 축열조 방향의 연결이 선택된다. 히트펌프의 응축기로는 고온 축열조의 물이, 증발기로는 저온 축열조의 물이 순환되도록 설계되었고 펌프 뒤에 필터를 장착하도록 하였다. 지하수는 3방 밸브에 의해서 저온 축열조로 공급될 것인가 고온 축열조로 공급될 것인가가 결정된다. 축열량이 부족할 때는 저온 축열조로 공급되고, 고온 축열조 온도가 너무 높아지면 고온 축열조 방향으로 공급된다.

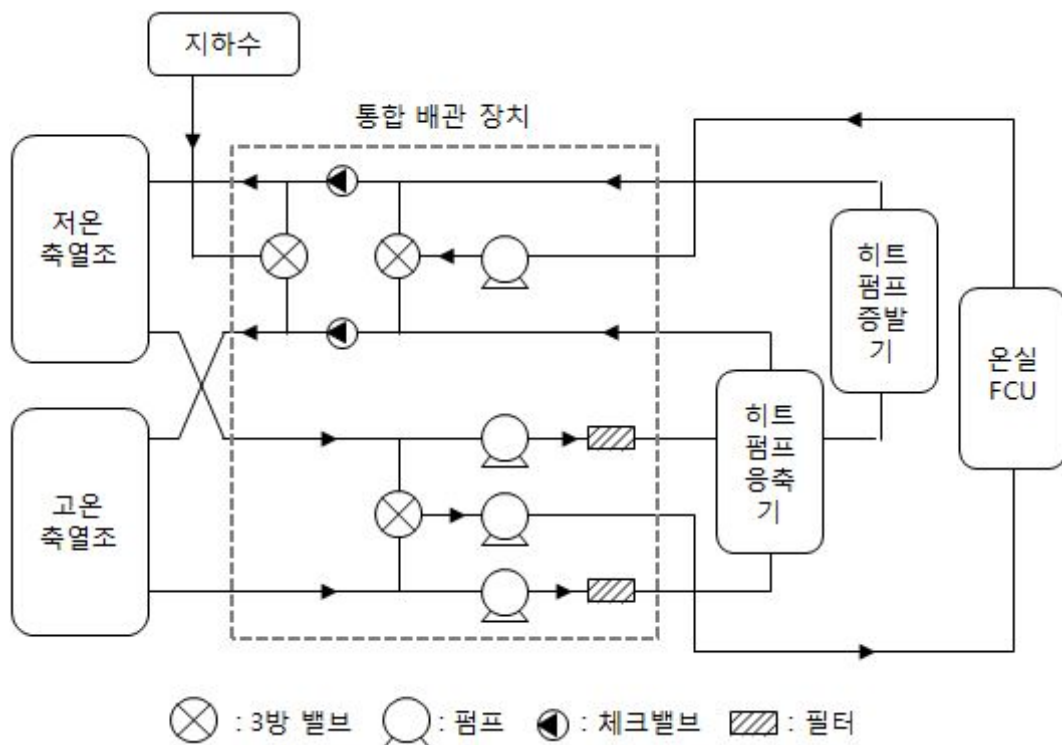


그림 130. 통합 배관 장치의 설계와 연결 구조

실제로 제작된 통합 배관 장치의 모습은 다음 그림 131과 같다.



그림 131. 통합 배관 장치의 사진

마. LPG 연소식 CO₂ 발생기

현장 평가용 LPG 연소식 CO₂ 발생기는 연소 용량을 500,000 kcal 급으로 크게 증가시켰고, 이에 적합한 열교환장치 및 배기가스 공급 및 배출 장치를 설계하였다. 그림 132에서 보는 것과 같이 설계된 CO₂ 발생기는 프레임 기준으로 바닥면 1967 × 700 mm, 높이 1400 mm로 설계되었다. 하단에 가스버너와 연소실이 있고, 그 상단에 가로 방향으로 배기가스와 냉각수가 흐르면서 열교환을 수행하는 방식으로 제작되었다.

CO₂ 발생기의 제어는 기술 개발 단계와 동일하게 연소실의 온도를 기준으로 완전 연소 여부를 판단하고 벤츄리 효과를 이용하여 배기가스를 외부공기와 혼합하면서 온실로 공급하게 된다. 또한 CO₂ 발생기의 제어 설정값들은 제어용 서버를 통하여 원격으로 입력될 수 있도록 개발되었고 연소실 온도, LPG 사용량 등은 에너지 통합 관리 프로그램을 통하여 실시간 모니터링 및 기록이 되도록 하였다.

제작된 CO₂ 발생기의 형태는 다음 그림 133과 같고, 온실에 설치된 이산화탄소 공급 덕트 설치 형태는 그림 134과 같다.

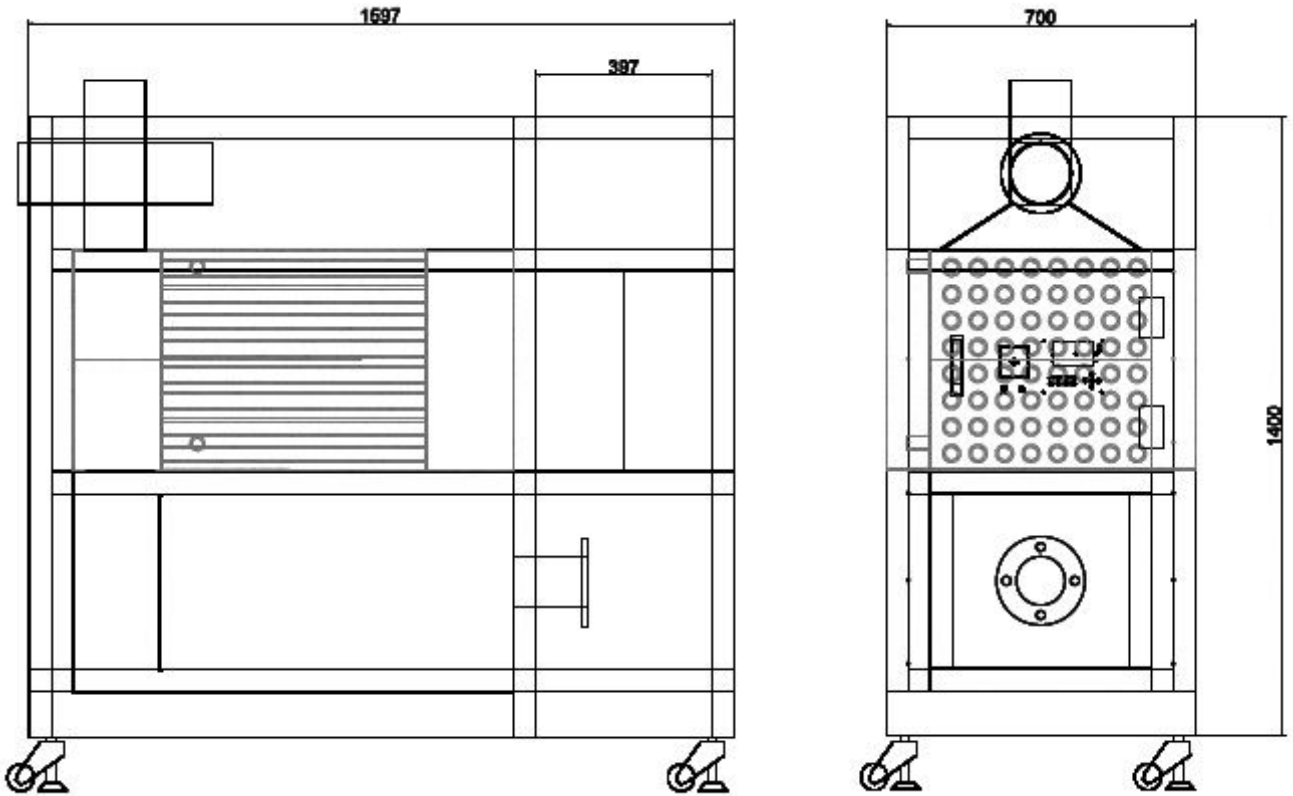


그림 132. 현장 평가용 CO₂ 발생기의 설계



(a) 내부 구조



(b) 외형

그림 133. 제작된 현장 평가용 CO₂ 발생기



그림 134. 이산화탄소의 외부 배출 및 내부 공급 덕트 구조

바. FCU와 보광, 상부 순환팬의 설치

온실 내 공기열 회수와 난방에 동시에 쓰이는 FCU를 총 20대가 설치되었고, 보광은 400W 고압 나트륨등이 총 42개가 설치되었다. 기술 개발 단계에서 활용되었던 상부의 FCU는 현장 평가에서는 상부 순환팬으로 대체 되었다. 현장 온실의 경우 규모가 크고 온실 상부가 높기 때문에 FCU를 설치하는 것도 어려울뿐더러 냉수 및 온수가 온실의 상부로 순환하면서 누수 및 겨울철 야간에 동결 등의 문제가 발생하면 유지 보수가 힘들다. 따라서 상부 순환팬을 설치하여 주간에 온실 상부에 고온의 공기가 형성되면 팬을 이용하여 그 공기를 온실 하단으로 내려 보낸다. 그 때 온실 하단에 설치된 FCU이 그 열을 회수하게 된다.

현장 평가 온실에 설치된 FCU와 보광의 모습은 그림 135 (a)와 같고 상부 순환팬이 설치된 형태는 그림 135 (b)와 같다.



(a) FCU와 보광 설치



(b) 상부 순환 팬

그림 135. FCU와 보광, 상부 순환팬의 설치 모습

3. 현장 평가 결과

가. 현장 평가용 히트펌프 시스템

현장 평가용으로 제작된 13 kW 급 히트펌프의 성능평가는 2011년 12월부터 2012년 3월까지 수행되었다. 성능 평가 기준은 앞서 설명한 COP로 산출하여 평가하였다. 현장에서의 성능평가는 하루 평균으로 산출하였다. 현장 평가용으로 개발된 히트펌프의 경우에도 안정성 면에서 아직 개선해야 할 점이 있기 때문에 시스템 운영이 완전한 날을 선별하여 COP 산출을 수행하였다. 2011년 12월의 히트펌프 성능 평가 결과 (그림 136), COP는 1.95 ~ 5.72로 폭넓은 변동이 발생하였는데 이와 같은 결과는 새로 설치된 히트펌프가 정상상태에 도달함에 따라 발생한 현상으로 파악된다. 따라서 12월 이후에는 보다 안정적인 COP를 보여주고 있다. 현장용 히트펌프의 경우 축열조의 지하수 순환량이 크게 증가하였기 때문에 필터의 교체 주기가 빨라지는 문제가 발생하였다. 필터가 이물질로 채워지게 되면 순환 유량이 줄어들고, 물펌프의 전력소모가 증가하여 히트펌프의 성능 저하로 이어질 수 있다. 특히 COP가 2 이하로 떨어진 12월 23일의 경우 필터의 교체가 이루어짐으로써 COP가 다시 회복되었음을 확인할 수 있었다.

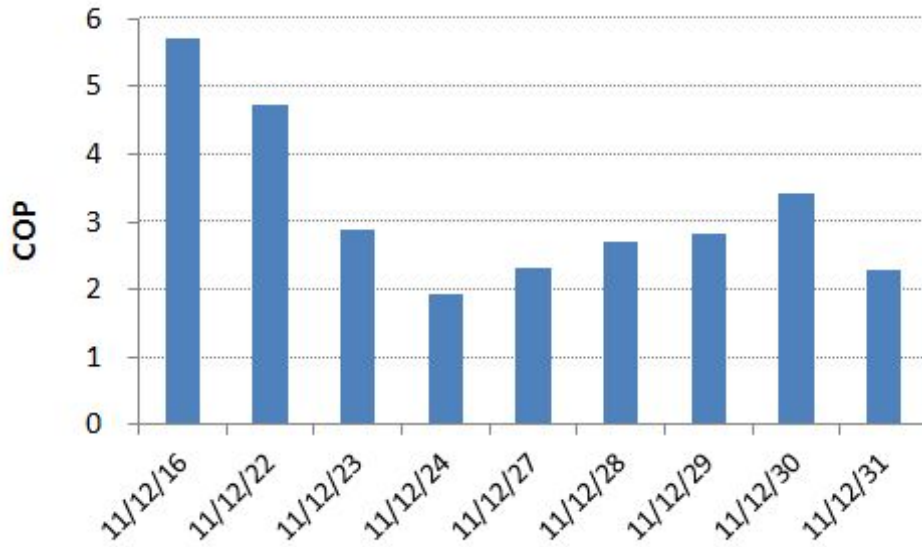


그림 136. 현장 용 히트펌프의 성능 평가 (2011년 12월)

2012년 1월의 경우 그림 137에서 보는 것과 같이 COP가 3 전후에서 안정적으로 유지되고 있음을 확인할 수 있다. 1월 평균 COP는 3.12인 것으로 확인되었다. 1월의 경우 난방부하가 컸기 때문에 히트펌프가 거의 하루 종일 작동을 하였는데 이 때문에 성능 결과가 일별로 일정한 수준을 보여주었다고 판단된다.

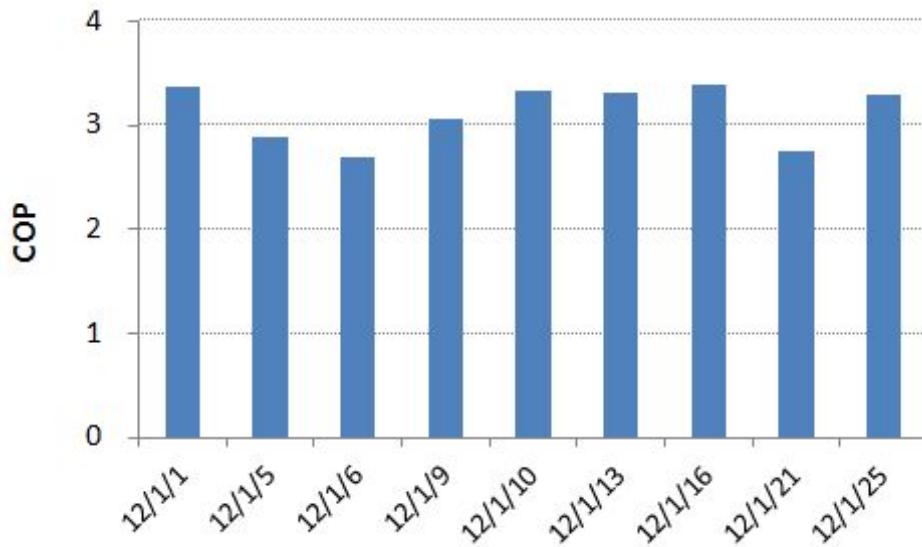


그림 137. 현장 용 히트펌프의 성능 평가 (2012년 1월)

2월의 경우에는 COP가 2.04 ~ 4.55로 다소 큰 변화를 보였으나 평균 3.25로 1월보다 조금 더 높은 성능을 발휘한 것으로 확인되었다 (그림 138). 2월의 경우 1월에 비해 난방부하가 줄어들면서 히트펌프의 운영 시간도 줄어들었고 이에 따라 COP의 일별 변동성은 조금 더 커진 것으로 판단된다.

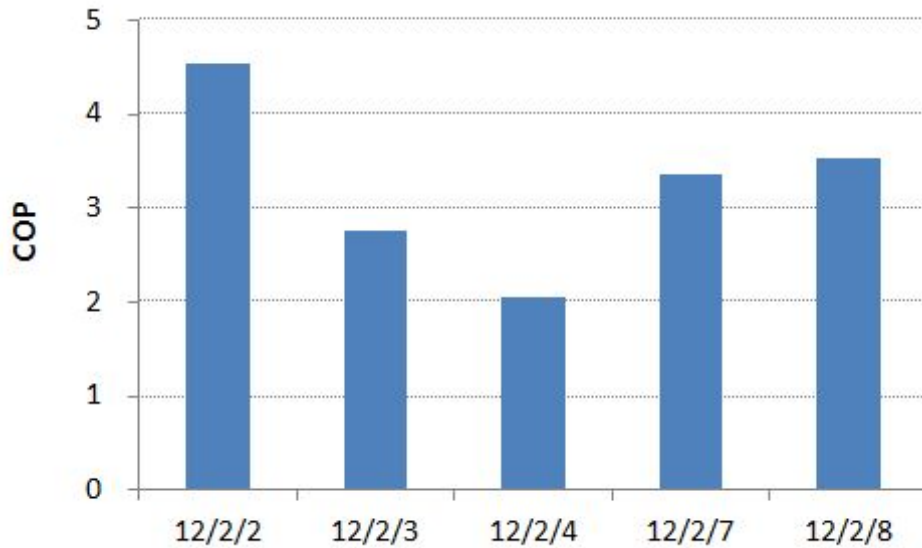


그림 138. 현장 용 히트펌프의 성능 평가 (2012년 2월)

마지막으로 3월의 경우 COP가 1.65 ~ 4.12로 산출되었고 평균은 지난달들에 비해 다소 떨어진 2.84로 확인되었다 (그림 139). 이와 같은 결과는 앞서 언급했던 히트펌프 운영 시간과 관계가 있다고 판단된다. 히트펌프의 경우 특히 작동 초반에 COP가 낮기 때문에 잦은 동작과 정지가 반복되면 COP는 낮게 나오게 된다. 따라서 이에 대한 제어 기술을 실용화 단계에서 보완해야 할 것이다.

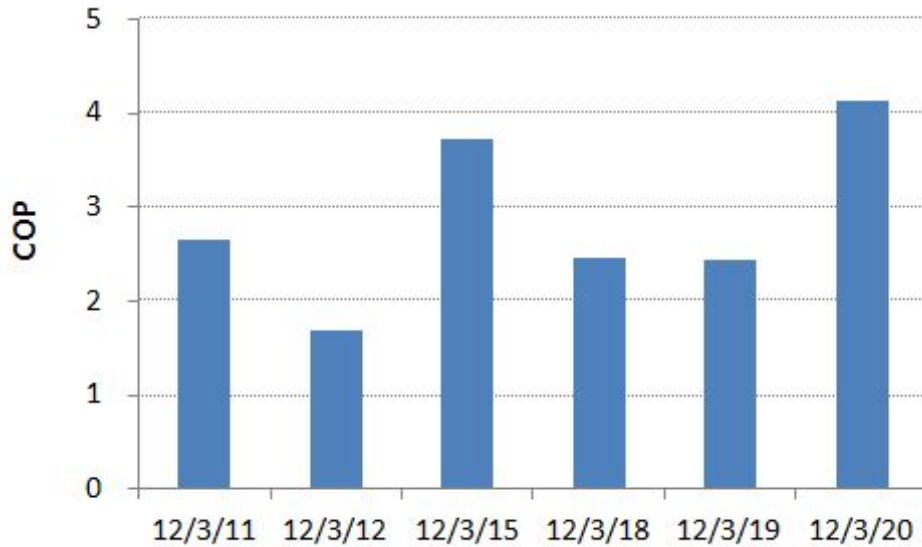


그림 139. 현장 용 히트펌프의 성능 평가 (2012년 3월)

나. 현장 평가용 연소식 CO₂ 발생기

현장 평가용 연소식 CO₂ 발생기의 경우 개발 단계의 것보다 약 2 배가량 연소 및 CO₂ 공급 용량이 증가시켜 제작 되었다. 현장 실험에서 CO₂ 공급은 오전 7시에 시작하여 오전 11시까지 총 4 시간동안 작동되었고 목표 농도는 1300 ppm 이었다. CO₂ 발생기의 성능은 2012년 2월과 3월의 데이터를 이용하여 평가되었다. 현장 온실은 CO₂를 공급하기 전의 초기 농도가 400 ~ 600 ppm을 형성하고 있었던 것이 확인 되었는데 이 현상은 플라스틱 연동 온실로 밀폐가 더 잘 되는 특성으로 인하여 야간 호흡에 의한 CO₂ 과잉일 가능성이 있다.

CO₂ 공급 결과는 월별 영향이 크지 않았다. 2012년 2월과 3월의 CO₂ 공급 결과(그림 140, 141)를 보면 목표 농도를 1300 ppm으로 설정했고 운영 결과 약 1200 ppm 수준에서 유지된 것으로 확인되었는데 이것은 제어 방식에서 발생한 현상이다. 개발된 CO₂ 발생기는 목표 농도를 1300 ppm을 설정해 두었을 때 200 ppm이 떨어지면 다시 CO₂를 추가로 공급하는 방식이다. 따라서 온실 내 CO₂ 농도는 1100 ~ 1300 ppm을 반복하게 되고 평균 농도가 1200 ppm이 된다. CO₂ 농도의 정밀제어에 관한 연구들은 따로 이루어지고 있기 때문에 본 연구에서는 이와 같은 ON/OFF 제어로 수행되었다.

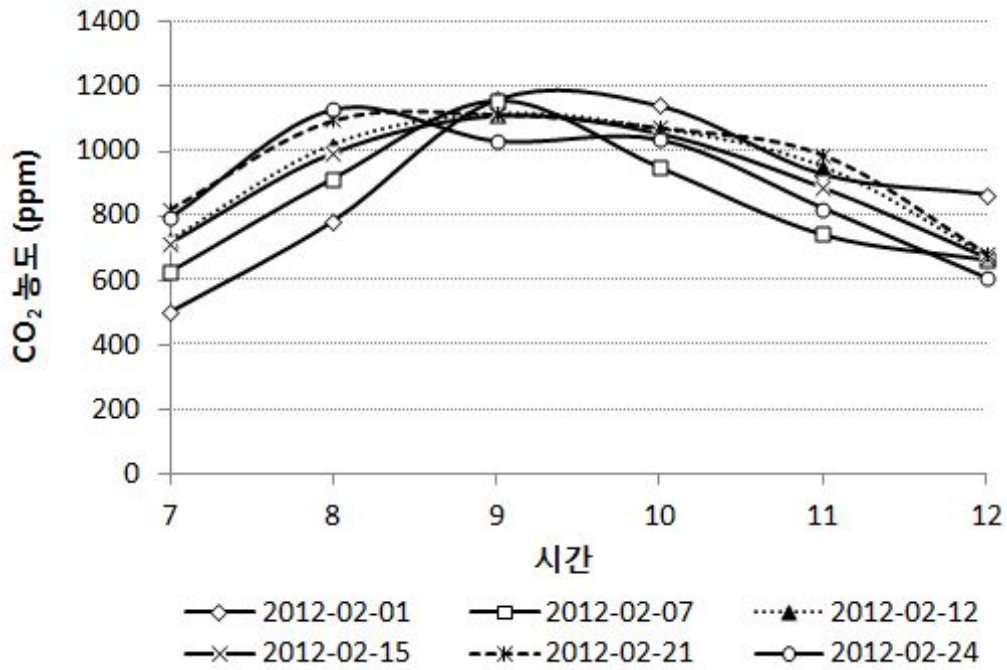


그림 140 CO₂ 발생기의 CO₂ 공급 성능 평가 (2012년 2월)

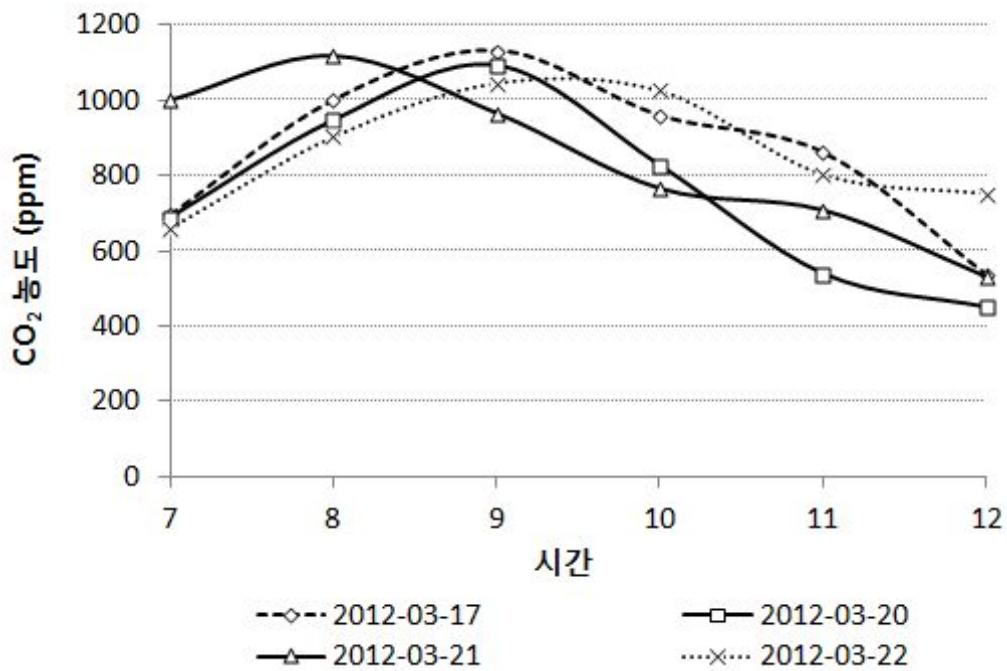


그림 141. CO₂ 발생기의 CO₂ 공급 성능 평가 (2012년 3월)

다. 에너지 사용량 평가

유비쿼터스 에너지 통합 제어 시스템의 에너지 사용량 모니터링 기능을 통하여 현장 평가 온실의 에너지 사용량 평가가 이루어졌다. 평가는 2012년 2월과 3월에 수행되었다. 그림 142에서는 보는 것과 같이 가장 많은 에너지를 소모하는 환경 관리 기계는 보광으로 하루 평균 138.8 kWh를 소모하였고 월별 변화는 없었다. 그 다음으로 히트펌프가 116.7 ~ 128.9 kWh의 많은 량의 에너지를 이용하였다. LPG의 경우 무게로 사용량을 측정하였는데, 하루 평균 6.4 ~ 6.6 kg의 LPG를 소모한 것으로 평가되었다. 환경 관리 기계 중에서 보광과 LPG의 경우 월별 차이가 거의 발생하지 않았으나, 히트펌프와 순환펌프/팬은 2월과 3월이 달랐다. 이와 같은 결과는 보광과 CO₂ 공급의 경우 정해진 시간만큼 작동하는 방식으로 운영되었기 때문에 나타나는 현상이고, 히트펌프의 경우 냉난방 시간에 따라 달라질 수 있기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다.

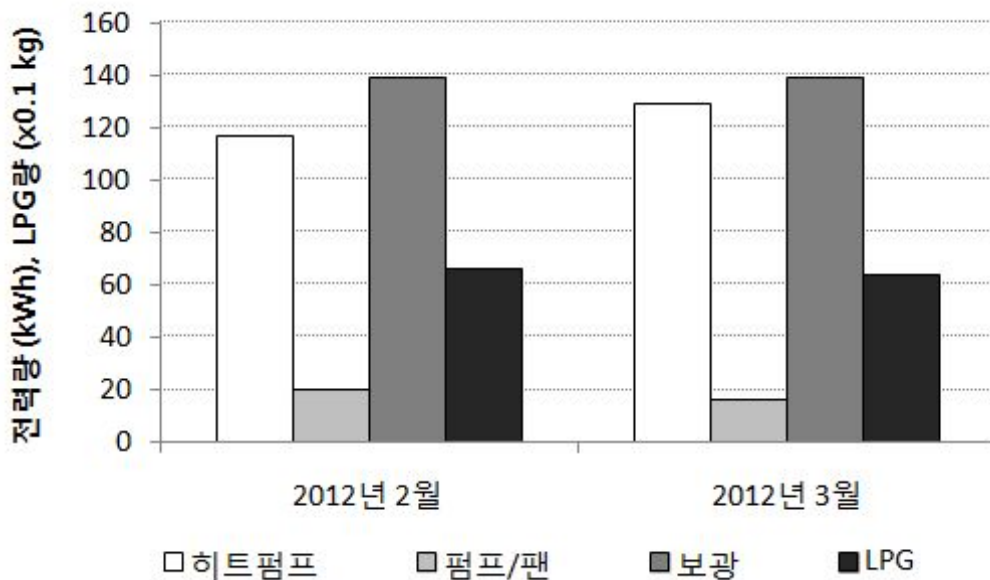


그림 142. 환경 관리 기계별 일평균 사용량

2011년 12월부터 2012년 3월까지 시스템으로부터 기록된 열량을 월별로 3일씩 취합하여 그래프를 그려보면 다음 그림 143과 같은 결과를 확인할 수 있다. 열 공급원은 지하수, CO₂발생기, 난방에 의한 회수열 이었고 그림에서는 그 값을 통합하여 하나의 막대로 표시하였다. 온실로 공급된 난방 열량은 선으로 표시하였다. 보는 것과 같이 난방 열량은 12월과 1월에 600 ~ 1000 Mcal 수준으로 측정되다가 2월부터 감소하였고 3월 중순이후로는 200 Mcal 이하로 떨어졌다. 12월과 1월의 열공급은 주로 지하수에 의해서 이루어졌고, 2월과 3월에는 CO₂ 발생기가

주를 이루었다. 2월 이후로는 냉방에 의한 회수열이 차지하는 양과 비율이 점점 증가하고 있음을 확인할 수 있었다.

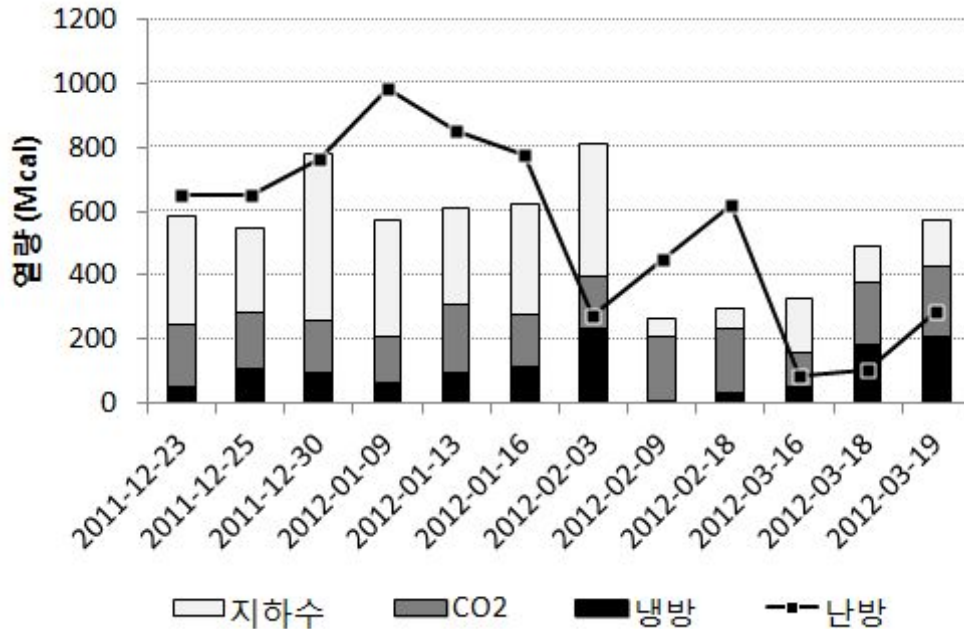


그림 143. 현장 평가 시스템의 열량 회수 및 공급 성능 평가

라. 환경 제어 성능 평가

2012년 2월의 전형적인 맑은날을 선택하여 온실 내부의 환경과 외부의 환경을 비교하여 환경 제어 성능을 평가하였다. 그림 144과 145는 각각 온실 내부 환경과 외부 환경의 변화를 나타낸 것이다. 온실 내부의 온도는 야간에 난방으로 인하여 16℃를 유지하였고 오후 1시 경 26℃에 도달할 때 냉방에 의한 열회수에 의하여 온도는 더 이상 상승하지 않았다. 오전 7시경부터 이산화탄소 공급이 이루어져서 오전 9 ~ 10시 사이에는 1000 ppm 이상이 유지되었다. 이때 외부의 환경은 온도의 경우 새벽 7시경 최저 -5℃까지 떨어졌고, 오후 1시 경에는 최대 2℃까지 상승하였다. 일사량은 오전 10시에서 오후 2시 사이에 500 ~ 600 W/m² 인 것으로 측정되었다.

따라서 개발된 유비쿼터스 환경-에너지 관리 시스템에 의한 환경제어는 목표한 수준에서 성공적으로 제어되었음을 확인할 수 있었다.

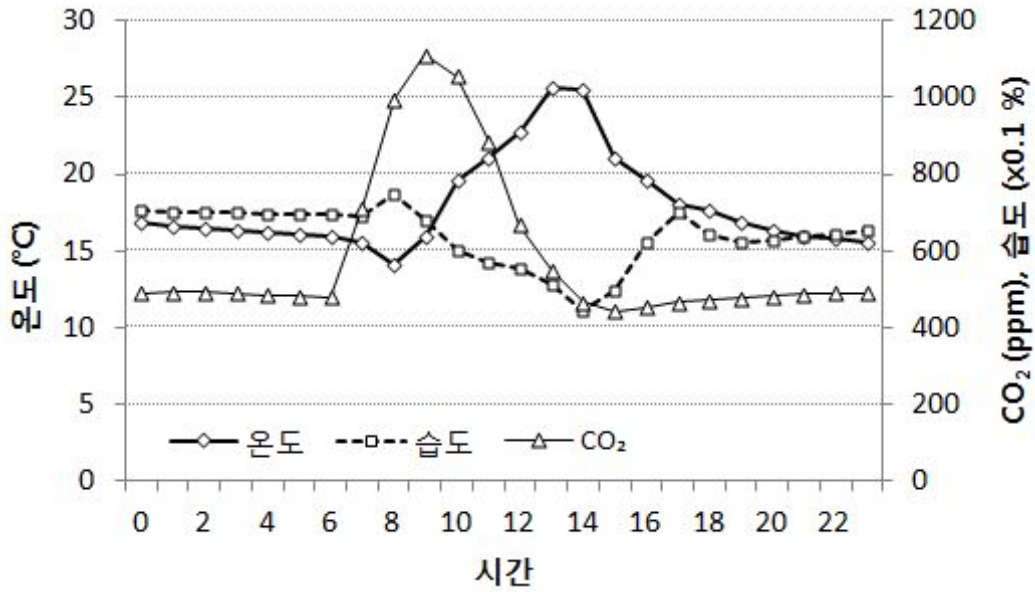


그림 144. 온실 내 환경 제어 결과 (2012년 2월 15일)

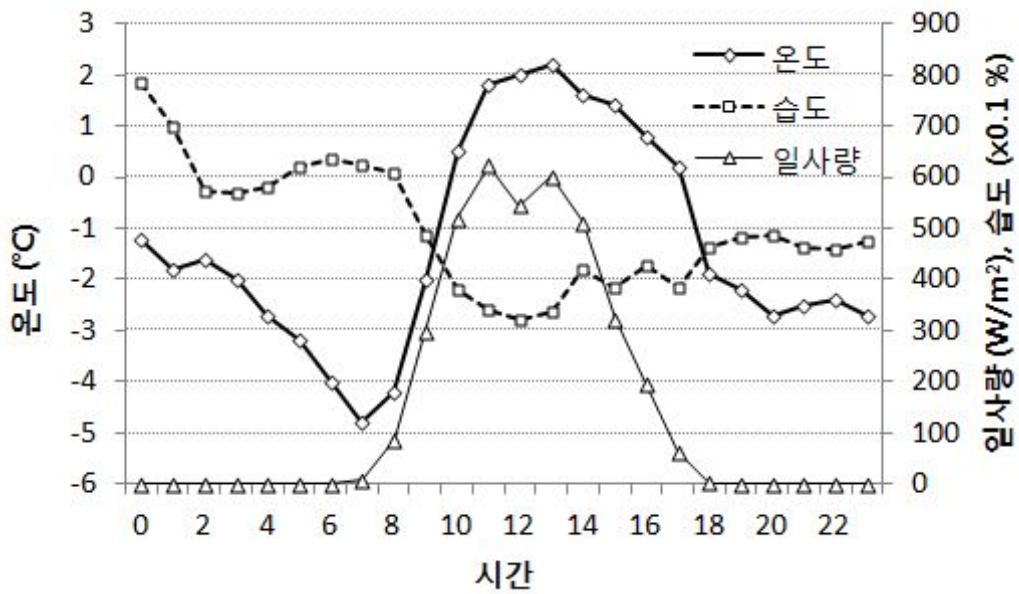


그림 145. 온실 외부 환경 조건 (2012년 2월 15일)

제 9 절 시스템 활용에 따른 식물의 생육 개선 효과 및 경제성

1. 중온기 효과와 경제성

가. 개요

LPG 연소식 이산화탄소 공급, 공기열 활용 시스템, 온실 환경 제어 시스템, 보광 시스템을 통합하여 원격감시 및 제어를 할 수 있는 유비쿼터스 복합 환경-에너지 관리 시스템을 이용하여 관행 재배 방식과 대비하여 난방비 및 작물의 생육 등을 비교·분석하였다. 시험작물은 분화 장미(영문명 : Rose, 학명 : Rosa hybrida)로 선정하였고 품종은 칼리브라(Calibra), 알로하(Aloha), 핫키스(Hot kiss), 바닐라(Vanilla), 스마일(Smile), 키스(kiss)로 선정하였다. 관행 제어 방식은 경유 보일러 난방, CO₂무공급, 무보광, 무냉방 및 타이머에 의한 환경제어를 수행하는 것으로 하였고, 복합 환경-에너지 제어 방식은 LPG 연소식 이산화탄소 공급, 공기열 활용, 원격 환경 제어 및 에너지 관리를 자동으로 수행하였다. 온실의 환경 제어 조건은 표 42과 같이 난방은 야간에 20℃ 이하일 때, 냉방은 주간에 27℃ 이상일 때 수행하였다. 이산화탄소과 보광은 실험온실에만 공급하였는데 이산화탄소는 오전 7 ~ 10시에 1300 ppm으로, 보광은 밤 10시부터 다음날 새벽 5시 까지 작동시켰다.

조사 항목으로는 온도, 습도, 생육특성, 난방비, 경제성분석 등을 선정하였다.

표 42. 가을철 장미 생육 실험을 위한 환경 제어 조건

구 분	실 험 온 실	대 조 온 실
난 방	20℃ 유지	20℃ 유지
냉 방	27℃ 이상에서 열회수	27℃ 이상에서 천창 개방
이산화탄소	7~10시, 1300 ppm	-
보 광	22~05시	-

나. 환경 제어 결과

2010년 9월과 10월의 환경 제어 결과의 예는 다음 그림 146, 147과 같다. 9월에는 초가을이라 대조 온실의 경우 난방을 수행하지 않았다. 하지만 실험 온실의 경우 개발된 시스템으로 냉난방이 동시에 이루어져야 하기 때문에 난방을 수행하게 된다. 따라서 야간의 온도가 실험 온실의 경우 20℃를 유지하였고, 대조 온실의 경우 16 ~ 17℃를 유지하였다. 실험 온실에는 추가

적으로 오전 7시 ~ 11시 사이에 이산화탄소를 1100 ~ 1300 ppm 으로 유지하였고, 보광이 밤 10시부터 다음날 새벽 5 까지 작동되었다.

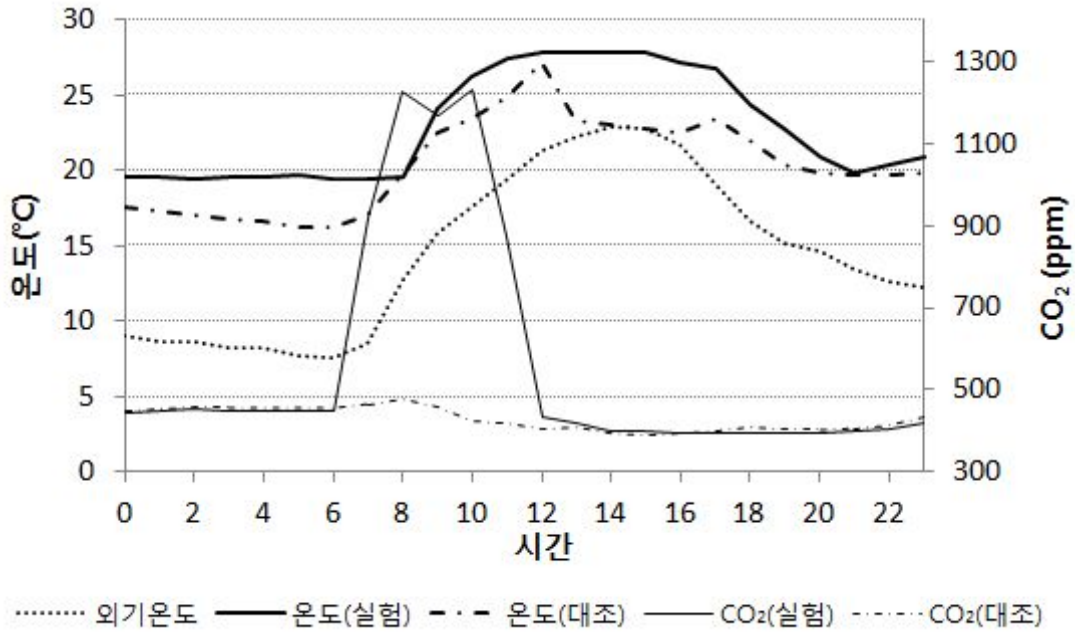


그림 146. 2010년 9월 29일 환경 제어 결과

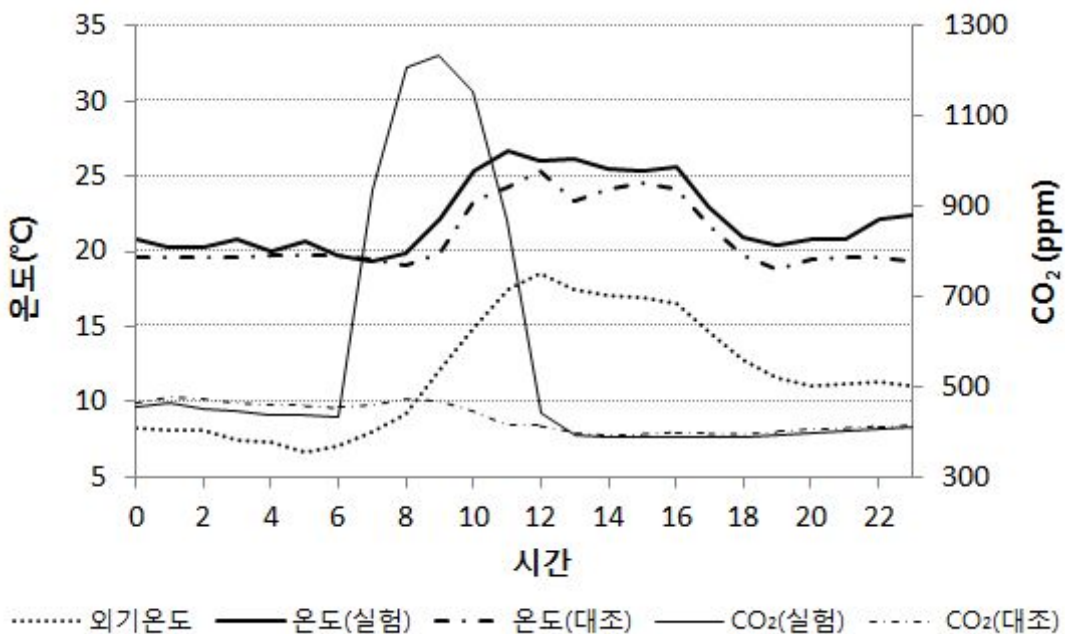


그림 147. 2010년 10월 31일 환경 제어 결과

이산화탄소 공급 시간대의 실험 온실과 대조 온실의 농도를 10월 한 달간 비교한 결과는 다음 그림 148와 같다. 실험 온실의 CO₂ 농도 평균은 1058 ppm 이었고, 대조 온실의 CO₂ 농도 평균은 437 ppm 이었다. 10월 15일의 경우 LPG통 교체, 10월 26, 27일은 CO₂ 공급기 이상으로 농도가 다소 낮게 유지되었다.

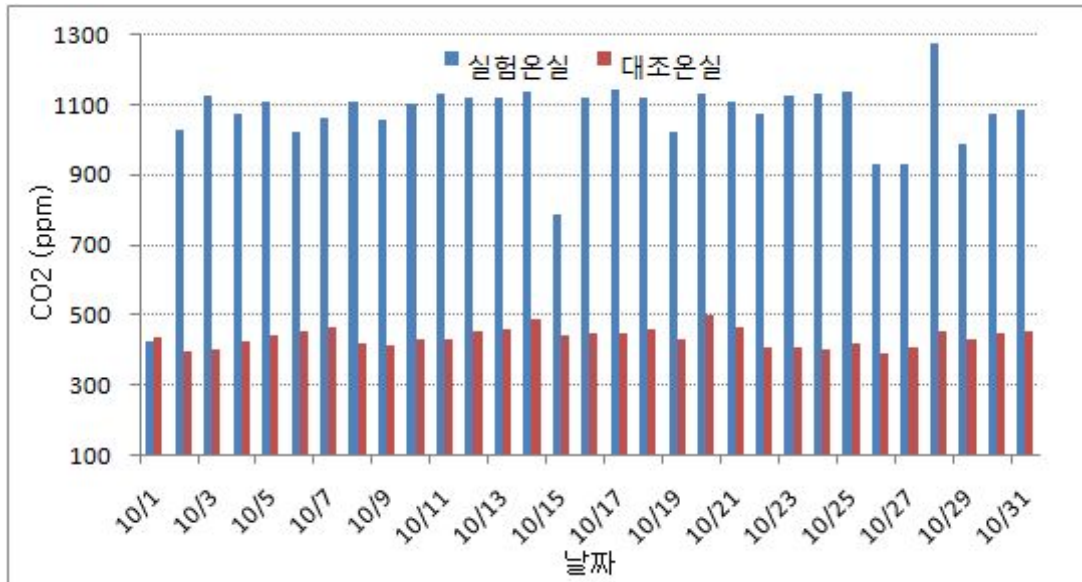


그림 148. 실험 온실과 대조온실의 이산화탄소 공급시간대 CO₂ 농도 비교

다. 실험 작물 생육 결과

분화 장미 재배 시험 결과 복합 환경-에너지 관리 온실(실험 온실)의 경우 관행 재배 온실(대조 온실)의 경우 보다 신초수는 0.5 - 1.9 개 많았으며, 꽃수는 1.4 - 3.2 개가 많아 상품성이 우수하였음이 확인되었다. 또한 실험 온실에서 생체중과 건물중 또한 더 높게 측정되어 장미 생육에 더 적합한 환경이 제공되고 있음을 확인할 수 있다. 구체적이 생육 비교는 다음 표 43과 같고 실험 온실과 관행 온실에서 최종 개화된 장비의 비교 사진을 그림 149에서 확인할 수 있다.

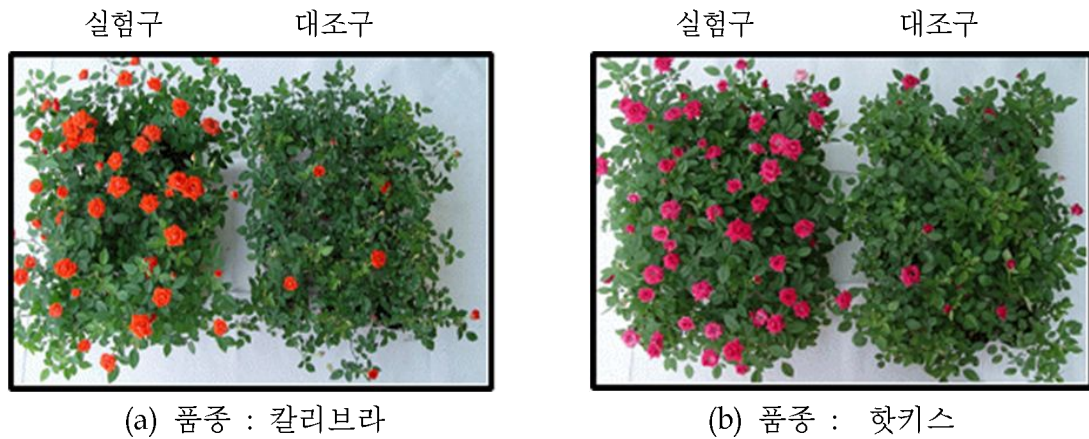


그림 149. 실험 온실과 관행 온실에서 재배된 분화 장미의 생육 결과

표 43. 가을철 실험 온실과 관행 온실의 작물 재배 특성 비교

품종별	처리 구별	신초수	꽃수 (개/분)	생체중 (g/분)			건물중 (g/분)		
				계	지상부	지하부	계	지상부	지하부
칼리 브라	시험구	8.1a	6.6a	24.5	20.7	3.8	6.5	5.5	1.0
	대조구	6.9b	5.2a	14.8	12.0	2.8	4.5	3.6	0.9
알로하	시험구	9.2a	6.6a	22.5	20.6	1.9	5.8	5.1	0.7
	대조구	7.3b	4.2b	17.1	14.6	2.5	4.9	4.1	0.8
핫키스	시험구	6.9a	6.1a	26.2	22.5	3.7	7.1	5.8	1.3
	대조구	6.3a	2.9b	16.3	12.6	3.7	4.9	3.7	1.2
바닐라	시험구	7.8a	6.7a	24.9	21.9	3.0	6.6	5.7	0.9
	대조구	7.3a	3.4b	14.1	11.5	2.6	4.1	3.4	0.7
스마일	시험구	7.8a	10.6a	46.9	39.2	7.7	11.7	9.4	2.3
	대조구	5.2b	5.6b	36.9	31.0	5.9	9.5	7.4	2.1
키스	시험구	6.7a	10.4a	52.5	44.2	8.3	14.1	11.2	2.9
	대조구	3.7b	3.7b	37.2	30.1	7.1	10.1	7.4	2.7

DMRT at 5% level

표 44에서 제시한 분화의 품종별 생육 결과를 바탕으로 통계 분석을 해본 결과 다음 표 41과 같은 결과를 얻었다. 신초수에서 통계적으로 유의한 개선을 보인 품종은 칼리브라, 알로하, 스마일, 키스 등이었고, 꽃수에서는 칼리브라를 제외한 모든 품종에서 유의한 생육 개선이 나타난 것으로 분석되었다. 꽃수의 경우 분화 장미 상품의 가격을 결정하는 중요한 요소이기 때문에 대부분의 품종에서 꽃수의 증가가 나타났다는 점은 개발된 시스템이 식물 생육 개선에 의한 농가 소득 향상에 도움을 줄 수 있다는 것을 보여준다.

표 44. 분화 장미 품종별 생육 결과 통계 분석

품 종	신초수		꽃수	
	처리구	대조구	처리구	대조구
칼리브라	8.1a	6.9b	6.6a	5.1a
알로하	9.2a	7.3b	6.6a	4.2b
햇키스	6.9a	6.3a	6.1a	2.9b
바닐라	7.8a	7.3a	6.7a	3.4b
스마일	7.8a	5.2b	10.6a	5.6b
키스	6.7a	3.7b	10.4a	3.7b

DMRT at 5% level

라. 에너지 사용량 및 비용 평가

사용된 에너지는 크게 전력량과 LPG, 경유로 나누어지고 실험 온실과 대조온실에서 11월에 사용된 일별 예는 다음 표 45와 같다. 2010년 11월 1일 ~ 2010년 11월 3일까지의 에너지 비용을 비교한 결과 관행 제어 방식에 비하여 복합 환경-에너지 제어 방식의 경우에 43% 가량 절감이 되었을 확인할 수 있다.

표 45 실험 온실과 대조 온실의 에너지 사용량 및 비용 비교

날짜	실험 온실			대조 온실		
	전력량 (kWh)	LPG (kg)	비용 (원)	전력량 (kWh)	경유 (L)	비용 (원)
2010-11-01	103.8	2.63	8,775	5.5	19.4	16,865
2010-11-02	100.3	2.94	9,236	10.5	20.1	17,648
2010-11-03	91.7	2.75	8,563	6.1	14.0	12,248

* 전기요금 : 36.4원/kWh(농사용 병), LPG 가격 : 1900원/kg, 경유 가격 : 859원/L (면세유)

2. 저온기 효과와 경제성

가. 환경 제어 결과

저온기의 실험은 2010년 12월부터 시작하여 2011년 2월까지 수행되었다. 실험 온실이 위치한 곳의 2010년 12월의 기온은 $-7.9 \sim 4.5^{\circ}\text{C}$ 로 측정 되었고, 맑은날 일사량은 600 W/m^2 이상 계측 되었다. 2011년 1월은 예전 기상과는 다르게 외부 기온은 야간에는 -10°C 이하로 떨어졌고, 주간에도 5°C 이상으로 상승하지 못하는 추운 날씨가 지속되었다. 최저 외기 온도는 2011년 1월 16일 오전 7시에 -16.3°C 를 기록하였다. 2월에는 일사량이 800 W/m^2 까지 상승하면서 기온이 다시 상승하였다. 야간 기온이 매우 크게 떨어지는 관계로 온실의 야간 난방 온도는 15°C 로 유지하였다. 주간에는 26°C 이상 온실 온도가 상승하면 냉방을 수행하였다. 12월, 1월, 2월 각각의 맑은날 기상변화를 기록한 결과는 다음 그림 150, 151, 152과 같다.

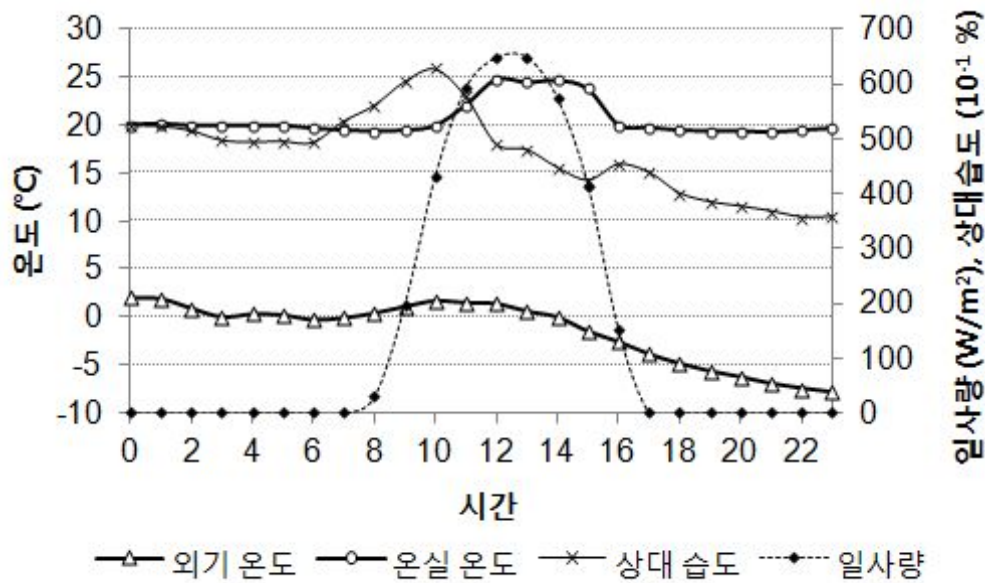


그림 150. 2010년 12월 맑은날 외부 기상 및 온실 환경 제어 결과
(2010년 12월 14일)

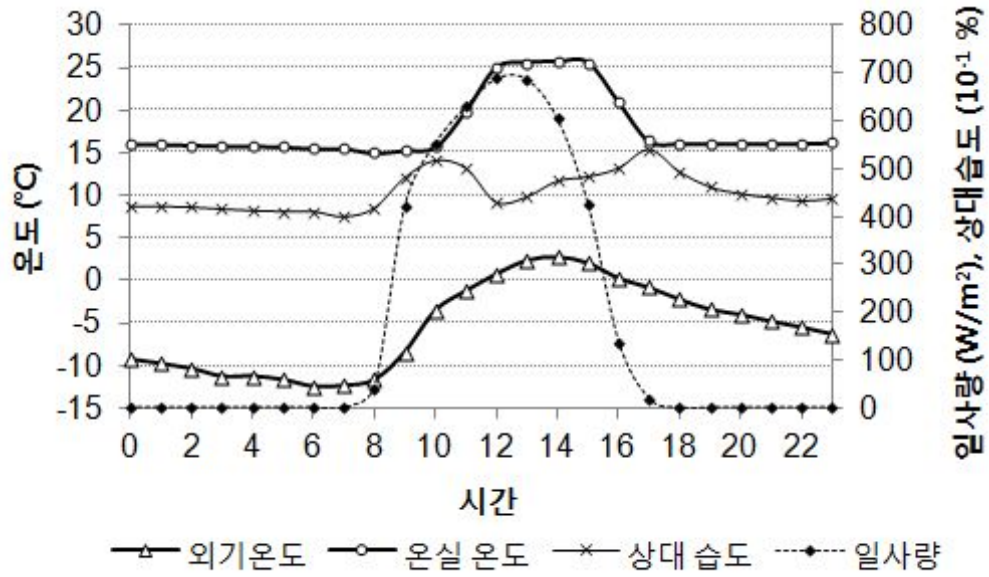


그림 151. 2011년 1월 맑은날 외부 기상 및 온실 환경 제어 결과
(2011년 1월 13일)

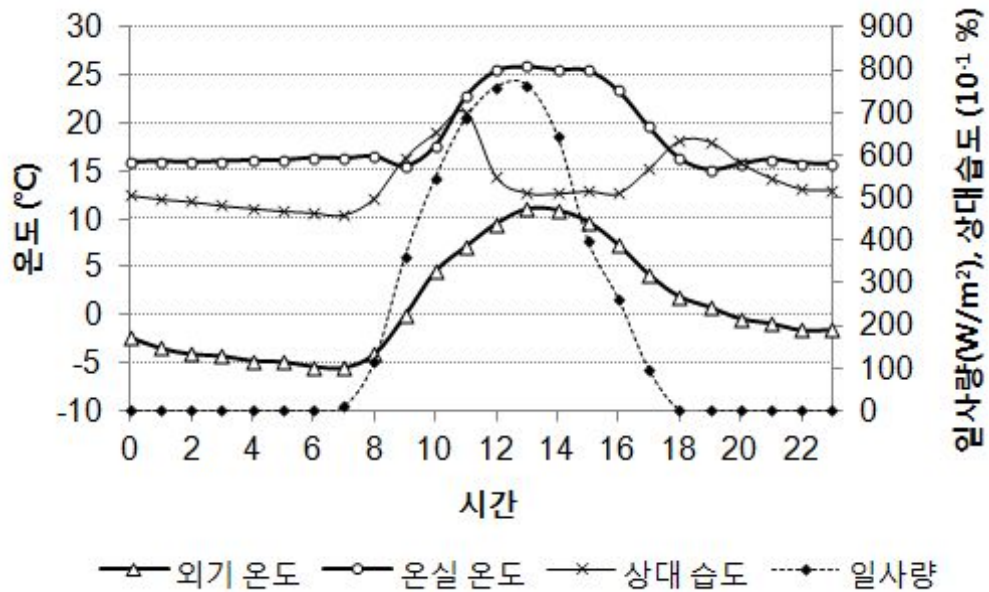


그림 152. 2011년 2월 맑은날 외부 기상 및 온실 환경 제어 결과
(2011년 2월 18일)

이산화탄소 공급은 해 뜨는 시간을 고려하여 가을철 보다 30분 늦은 오전 7시 30분부터 11:30 분까지 4시간 동안 공급하였고 CO₂ 농도는 1200 ~ 1300 ppm 이었다. 보광은 가을철과 동일하게 밤 10시부터 다음날 새벽 5시까지 8시간 동안 작동하였다. 온실 내 이산화탄소 농도의 실측 값과 보광 작동 시간은 그림 153에서 보는 것과 같다.

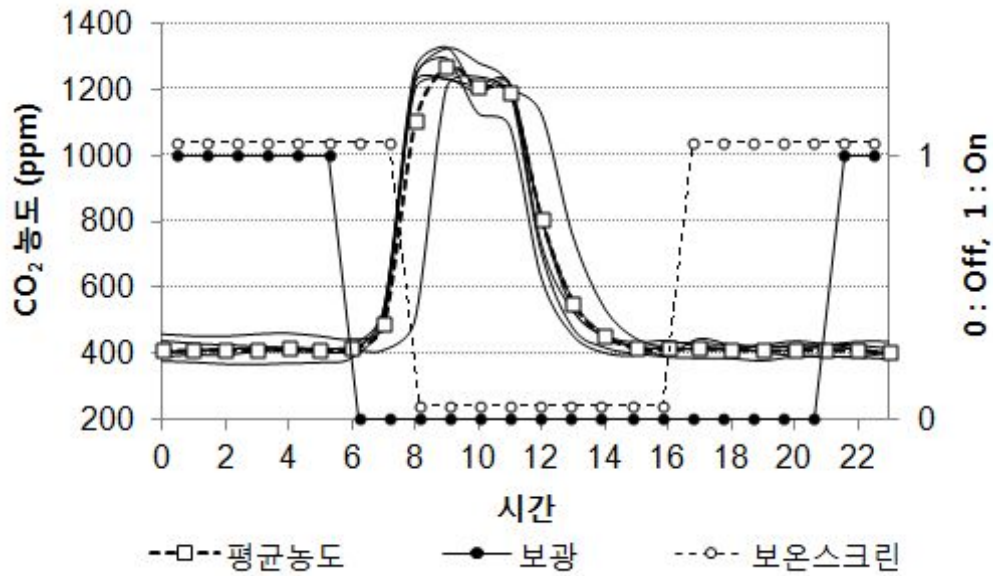


그림 153. 겨울철 이산화탄소 공급 결과 및 보광, 보온스크린 작동 현황

나. 실험 작물 생육 결과

저온기 작물 생육 결과는 표 46에 정리하였다. 전반적으로 꽃수가 많지 않았으나 복합 환경 제어를 수행한 경우가 관행에 비해 신초수와 꽃수에서 모두 증가를 보였다. 대조구 대비 꽃수 증가율은 핫키스의 경우 226.3%, 골디 150.0%, 솔레로 63.2%, 레드 메르세데스 220.0% 였다. 생체중 및 건물중도 대체로 더 높게 측정되어 복합 환경 제어에 따른 생육 개선 효과가 분명하게 확인되었다.

2010년 12월 12일에 시작된 겨울철 재배 실험 결과는 그림 154에서 보는 것과 같이 관측을 통한 결과만으로도 생육 결과의 차이를 쉽게 확인할 수 있다. 실험 온실의 경우가 관행 온실에 비해 꽃수와 신초수에서 큰 차이로 좋은 결과를 보여주고 있다.

표 46. 저온기 실험 온실과 관행 온실의 작물 재배 특성 비교

품종별	처리 구별	신초수	꽃수 (개/분)	생체중 (g/분)			건물중 (g/분)		
				계	지상부	지하부	계	지상부	지하부
햇키스	시험구	7.1	6.2	39.30	31.54	7.76	11.03	8.99	2.04
	대조구	3.7	1.9	22.66	17.14	5.52	6.57	4.82	1.75
폴디	시험구	6.6	5.5	28.78	24.93	3.85	6.95	5.95	1.00
	대조구	3.9	2.2	20.64	17.22	3.42	5.72	4.76	0.96
솔레로	시험구	3.7	3.1	34.01	27.89	6.12	9.16	7.58	1.58
	대조구	2.3	1.9	18.00	14.37	3.63	4.70	3.74	0.96
레드 메르세데 스	시험구	4.2	3.2	34.82	30.07	4.75	8.74	7.62	1.12
	대조구	2.3	1.0	47.02	37.32	9.70	4.08	3.02	1.06

<실험 온실>



<관행 온실>



(a) 2010년 12월 12일 - 재배 시작



(b) 2011년 1월 25일 - 꽃 봉오리 형성



(c) 2011년 2월 3일 - 개화 시작



(d) 2011년 2월 15일 - 만개

그림 154. 겨울철 재배 실험 결과 (기간별 생육 차이)

다. 저온기 복합 환경-에너지 관리 온실의 경제성 평가

저온기 실험 온실의 경제성 평가는 사용한 전력량(장치 운영 및 보광), LPG, 경유 사용량을 비용을 환산하여 대조 온실과 비교하는 것으로 수행되었다. 표 47은 겨울철 실험 온실과 대조 온실의 에너지 사용량과 비용을 비교한 것으로 실험 온실에서 주로 전기를 소모하였고 대조 온실에서는 경유를 소모한 것을 확인할 수 있다. 비용으로 환산할 경우 실험온실의 경우가 대조 온실에 비하여 12월에는 37.5%, 1월에는 43.0%, 2월에는 33.7%, 3월에는 47.1% 절감되는 것으로 평가되었다. 겨울철 전체 비용 절감율은 40.8% 였다. 1월에 비용 절감 효과가 컸던 것은 난방량이 많아짐에 따라서 대조 온실의 경유 사용량 증가에 따른 것이고 3월에 비용 절감 효과가 큰 것은 복합 환경-에너지 관리 시스템의 효율이 크게 증가하는 기상 조건에 따른 것으로 판단된다.

표 47. 저온기 실험 온실과 대조 온실의 에너지 비용 비교

연.월	실험 온실				대조 온실			비용 절감율
	전력량 (kWh)	보광 (kWh)	LPG (kg)	비용 (원)	전력량 (kWh)	경유 (L)	비용 (원)	
2010.12	5598.9	1424.3	78.1	389,649	168.3	649.6	623,231	37.5%
2011.1	8595.3	1278.7	89.0	515,596	220.3	943.2	904,059	43.0%
2011.2	3921.4	1254.7	72.3	313,104	163.4	491.0	472,398	33.7%
2011.3	2958.9	1394.1	80.6	297,513	171.8	585.6	562,574	47.1%

* 전력량 : 36.4원/kWh(농사용 병), 전력량(보광) : 26.3원/kWh(농사용을), LPG : 1900원/kg, 경유 : 950원/L (면세유)

겨울철 일별 에너지 비용 절감율 분석에 대한 결과는 그림 155과 같다. 에너지 비용 절감율은 기상 조건에 따라서 30 ~ 50% 수준에서 대부분 평가되었고 3월에는 대부분 50%를 상회하는 비용 절감 효과가 확인되었다.

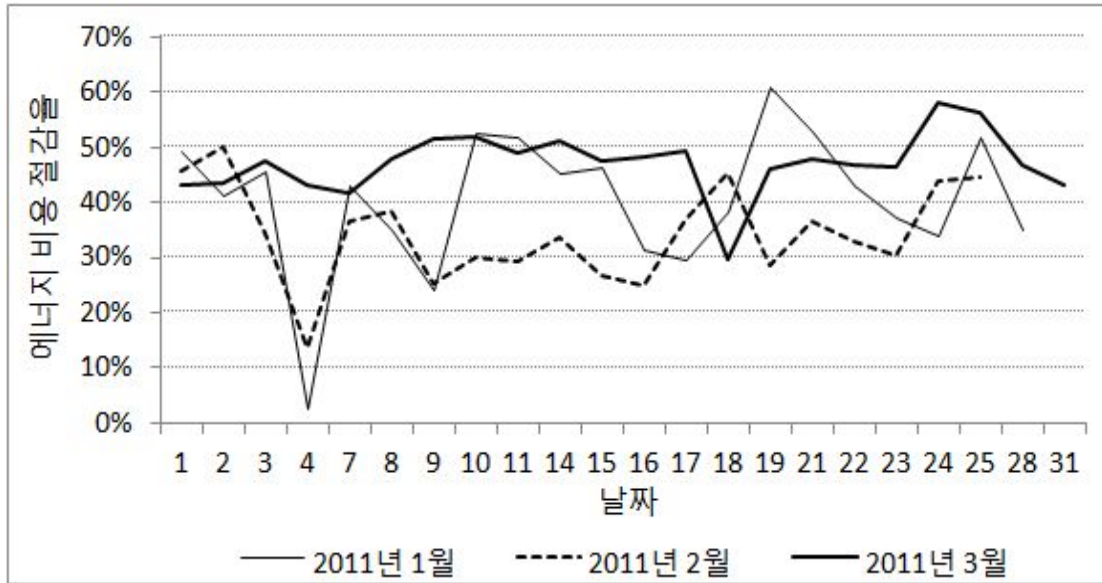


그림 155. 저온기 에너지 비용 절감 효과

3. 고온기 효과와 경제성

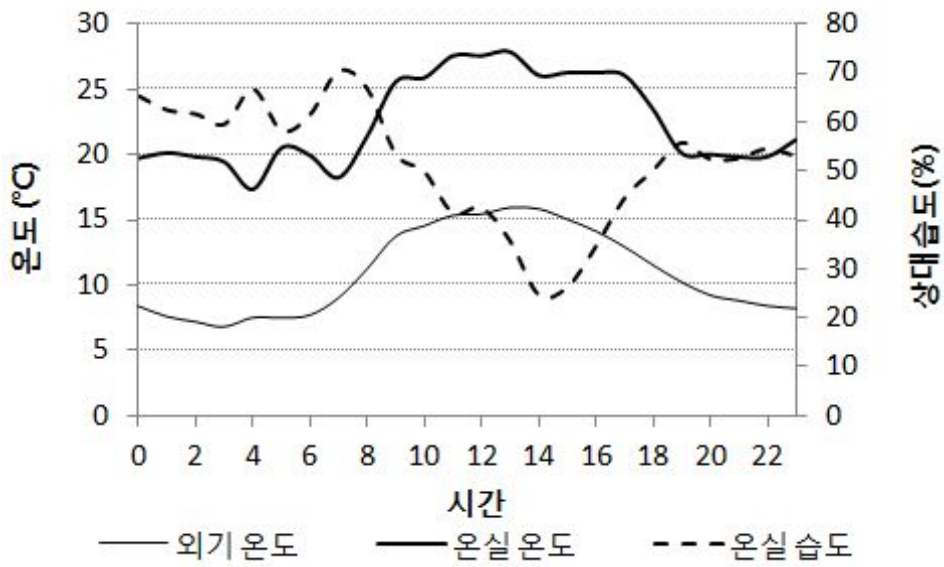
가. 환경 제어 결과

복합 환경-에너지 관리 시스템을 이용한 여름 작물 생육 실험은 오전에 해가 뜬 이후 이산화탄소를 3시간 가량 공급해 주는 것을 목표로 진행되었다. 이산화탄소 공급 시간대는 오전 7시부터 오전 10시까지 (3시간) 공급하였다. 고온기의 경우 강한 일사량에 의해서 냉방부하가 매우 커지기 때문에 오전 10시 이후에도 냉방을 수행하는 것은 경제성이 떨어진다. 공급된 이산화탄소 농도는 1200 ~ 1300 ppm 수준이었다. 보광의 경우 4월에는 밤 10시부터 다음날 새벽 5시 까지 작동하였으나, 6월 이후에는 야간에도 고온 조건이 유지되어 보광 작동을 하지 않았다.

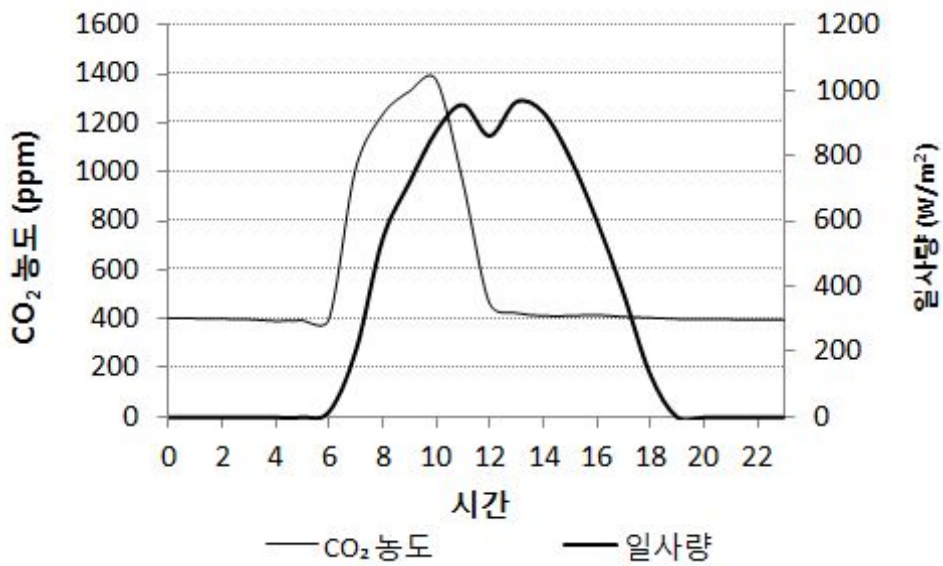
초기에 목표한 냉방을 통한 온실의 밀폐를 유지하여 이산화탄소를 공급하려는 것은 복합 환경-에너지 관리 시스템 이용하여 성공적으로 수행되었다. 이산화탄소 공급시간 이후에는 냉방이 중지하고 창을 개방하였고 이 때 CO₂ 농도는 급격히 감소하였다.

관행으로 운영되는 대조 온실의 경우 환기와 차광만 수행되었다. 생육 실험은 4월부터 8월까지 총 5개월에 걸쳐서 진행되었고 4월, 6월, 8월의 대표적인 기상 환경 및 환경 제어 결과는 그림 156, 157, 158에 각각 도시하였다.

실험 작물은 장미(영문명 : Rose, 학명 : Rosa hybrida)로 선정하였고 품종은 4월에는 스마일 (Smile), 키스(kiss), 6월에는 칼리브라(Calibra), 키스(Kiss) 두 가지로 각각 선정하였다.

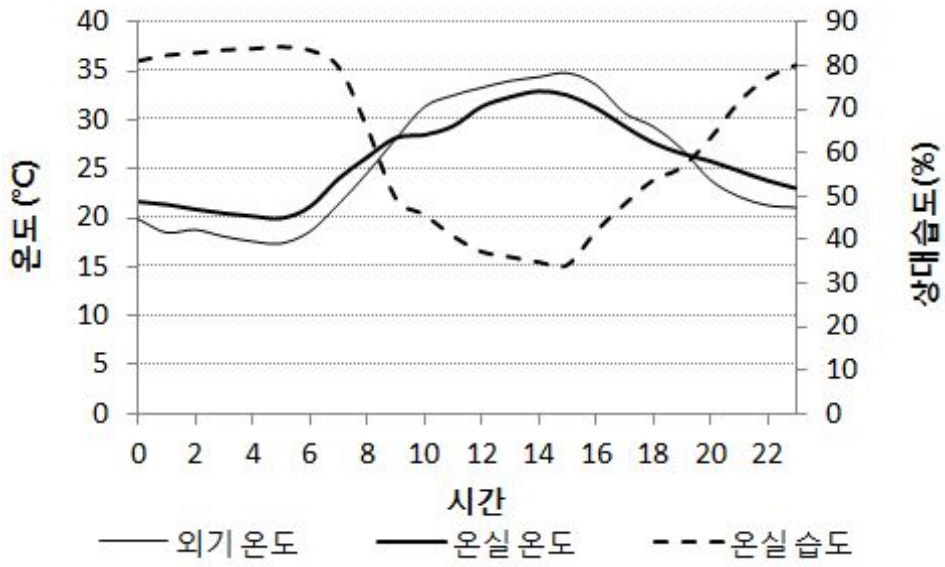


(a) 온도 및 습도 변화

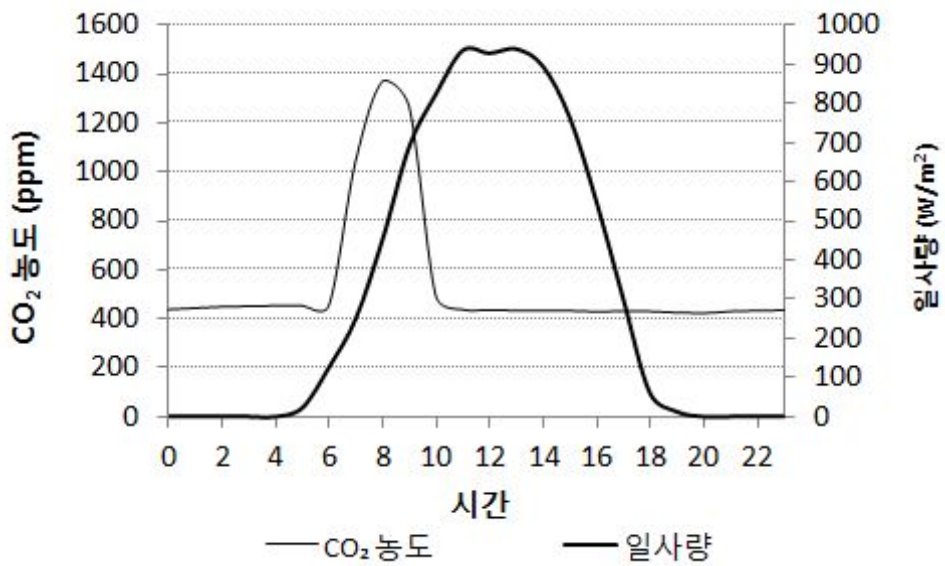


(b) CO₂ 농도 및 일사량 변화

그림 156. 2011년 4월 (고온기) 온실의 환경 변화 (2011년 4월 23일)

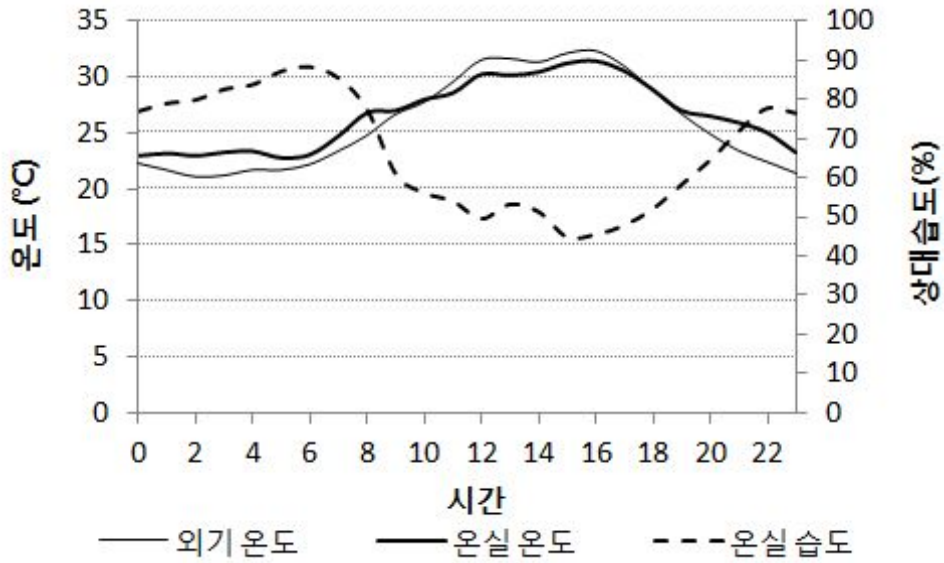


(a) 온도 및 습도 변화

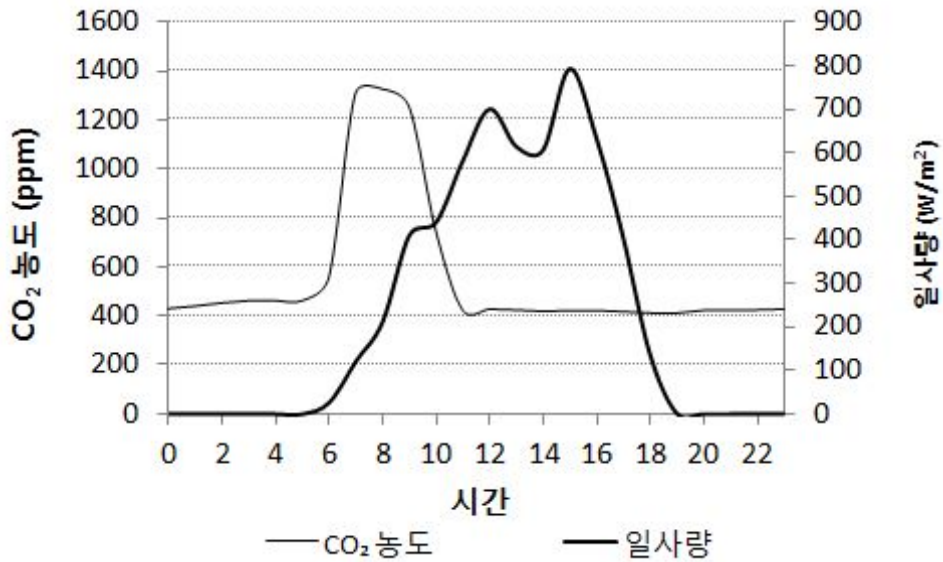


(b) CO₂ 농도 및 일사량 변화

그림 157. 2011년 6월 (고온기) 온실의 환경 변화 (2011년 6월 15일)



(a) 온도 및 습도 변화



(b) CO₂ 농도 및 일사량 변화

그림 158. 2011년 8월 (고온기) 온실의 환경 변화 (2011년 8월 22일)

나. 실험 작물 생육 결과

2011년 4월의 생육 결과 (표 45), 스마일 품종의 경우 처리구의 신초수와 꽃수는 각각 7.8 개, 10.6 개였던 반면 대조구에서는 각각 5.2 개, 5.6 개로 복합 환경-에너지 관리 시스템으로 재배한 작물에서 신초수 50.0% 꽃수 89.2%의 생육 개선이 나타났다. 생체중과 건물중의 경우에서도 10 ~ 30% 무게가 더 나아가서 작물의 생육 상태가 더 좋았던 것으로 분석되었다.

키스 품종의 경우 더 개선된 결과를 확인할 수 있었다. 신초수는 대조구 3.7개에서 처리구 6.7개로 81.1%, 꽃수는 3.7개에서 10.4개로 181.1%의 획기적인 생육 개선이 있었다. 생체중과 건물중의 경우 7.8 ~ 46.8%의 개선을 보였다.

이와 같이 매우 큰 생육 개선이 확인된 원인으로는 개별 환경 요소 조절이 아닌 복합 환경 조절에 의한 것으로 판단된다. 복합 환경-에너지 관리 방식과 관행 방식은 온도 조건만 동일하게 유지되었고, 이산화탄소, 광, 습도의 경우 복합 환경-에너지 관리 방식에서만 조절을 해주었다.

표 48. 분화 장미 생육 실험 결과 (2011년 4월)

품명	구분	반복			상부(g)		하부(g)	
			신초수	꽃수	생체중	건물중	생체중	건물중
스마일 (Smile)	처리구	I	7.8	10.2	39.83	9.48	7.22	2.15
		II	7.8	11.0	40.73	9.72	8.39	2.47
		III	7.9	10.6	36.94	8.92	7.37	2.17
		평균	7.8	10.6	39.17	9.37	7.66	2.26
	대조구	I	5.4	5.6	31.46	7.45	5.23	2.00
		II	5.5	5.9	31.55	7.64	6.13	2.08
		III	4.9	5.3	29.89	7.12	6.22	2.09
		평균	5.2	5.6	30.97	7.41	5.86	2.06
키스 (Kiss)	처리구	I	6.4	10.7	43.84	11.05	8.38	2.84
		II	7.1	10.6	48.04	12.15	8.81	3.05
		III	6.6	10.0	40.75	10.49	7.82	2.82
		평균	6.7	10.4	44.21	11.23	8.34	2.90
	대조구	I	4.0	4.0	31.02	7.44	7.58	2.73
		II	3.7	3.7	30.62	7.59	6.89	2.70
		III	3.5	3.5	28.68	7.11	6.75	2.65
		평균	3.7	3.7	30.11	7.38	7.08	2.69

2011년 6월의 생육 결과는 분화 장미의 상품성에 가장 큰 영향을 미치는 신초수와 꽃수를 중심으로 분석되었고 그 결과는 표 46에 표시한 것과 같다. 칼리브라의 신초수와 꽃수는 대조구에 비해 처리구에서 각각 33.3%와 31.0% 증가하였고, 키스(Kiss)의 경우 신초수와 꽃수 모두 30.0%씩 증가함을 보였다. 4월의 생육 결과에 비해서 6월에 그 효과가 줄어든 것은 복합 환경 제어 요소 중 보광이 빠졌기 때문인 것으로 예상해 볼 수 있다. 또한 주간의 30℃ 이상의 기온에 의하여 복합 환경 제어 효과가 감소했을 것으로 판단된다.

표 49. 분화 장미 생육 실험 결과 (2011년 6월)

품명	구분	반복	신초수	꽃수
칼리브라 (Calibra)	처리구	I	5.7	5.5
		II	5.4	5.4
		III	5.6	5.6
		평균	5.6	5.5
	대조구	I	4.5	4.5
		II	4.5	4.5
		III	3.7	3.7
		평균	4.2	4.2
키스 (Kiss)	처리구	I	5.2	5.2
		II	5.2	5.2
		III	5.2	5.2
		평균	5.2	5.2
	대조구	I	4.1	4.1
		II	4.1	4.1
		III	3.9	3.9
		평균	4.0	4.0

2011년 8월의 경우 (표 47) 칼리브라의 경우 신초수에서 60.0%, 꽃수에서 119.2% 증가를 보였고, 키스의 경우 신초수와 꽃수에서 각각 31.0%, 56.3%의 증가를 보였다. 주간 기온이 30℃ 이상으로 상승하는 6월과 8월의 경우 신초수와 꽃수의 절대 개수는 4월의 처리구에 비해 적다. 하지만 4월의 대조구 수준의 꽃수를 확보할 수 있기 때문에 고온기 복합 환경-에너지 관리 시스템을 활용할 경우 상품성 있는 분화 장미를 생산할 수 있는 것으로 판단되어 농가 수익의 지속성을 확보 할 수 있을 것이다.

표 50. 분화 장미 생육 실험 결과 (2011년 8월)

품명	구분	반복	신초수	꽃수
칼리브라 (Calibra)	처리구	I	4.9	5.0
		II	6.0	6.2
		III	6.0	5.8
		평균	5.6	5.7
	대조구	I	3.6	3.2
		II	4.0	2.8
		III	2.9	2.0
		평균	3.5	2.6
키스 (Kiss)	처리구	I	5.5	4.8
		II	5.2	4.8
		III	5.8	5.4
		평균	5.5	5.0
	대조구	I	4.3	3.2
		II	4.1	3.3
		III	4.2	3.2
		평균	4.2	3.2

다. 고온기 복합 환경-에너지 관리 온실의 경제성 평가

고온기의 경우 관행 온실에서는 환기 및 차광 스크린만 작동시킨다고 할 때 소모되는 에너지는 거의 없다고 할 수 있다. 복합 환경-에너지 관리 시스템에서는 냉방과 이산화탄소 발생을 위해서 전기와 LPG 소모가 발생한다. 따라서 단순히 운영 비용 측면에서 복합 환경-에너지 관리 시스템의 경제성을 평가하는 것은 적절하지 못하다. 따라서 작물 생육 개선에 따른 상품성 향상이나, 고온기에 생육 환경이 적절하지 못하여 생산을 하지 않던 것을 생산하게 되었을 경우 발생하는 이득 등을 산출하여 경제성을 평가하였다.

복합 환경-에너지 관리 시스템의 고온기 소요 비용을 5월에서 8월까지로 산출해 본 결과, 다음 그림 159와 같다.

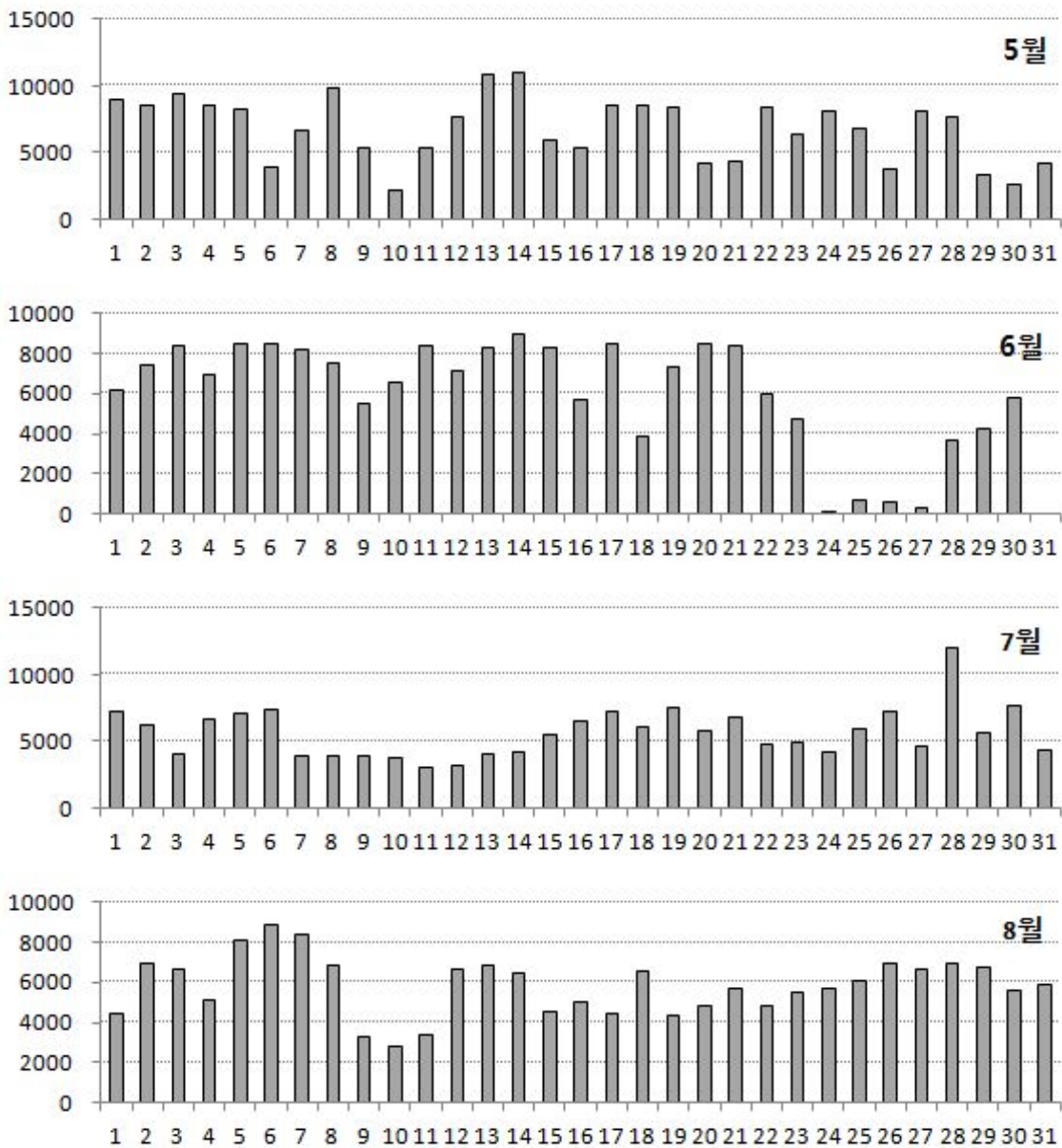


그림 159. 고온기 복합 환경-에너지 관리 시스템의 운영 비용

5월 ~ 8월 중 복합 환경-에너지 관리 시스템의 운영에 소요된 비용은 대략 2,000원 ~ 10,000 원 사이인 것으로 확인되었다. 비용이 2,000원 이하로 산정된 날의 경우 시스템 점검, 예러 발생, 작물 관리 등의 이유로 CO₂ 공급을 수행하지 않은 날이다. CO₂를 정상적으로 공급한 날의 일 평균 비용은 5월에 7163 원/day, 6월에 7114 원/day, 7월에 5691 원/day, 8월에 6009 원/day 가 소요된 것으로 계산된다. 전체 평균을 기준으로 분화 장미의 일반적인 생육 기간인 45일을 기준으로 산출하면 분화 장미가 개화되어 출하되기까지 100 m² 규모 온실 기준 292,000 원이 소요된다. 실험 온실에서 재배한 분화는 1200주로써 1주당 243원 이상의 수익을 낼 수 있다면 본 시스템 운영으로 에너지 비용 면에서는 수익이 발생할 수 있다.

제 10 절 현장 온실의 시스템 운영에 따른 생육 개선 효과와 경제성

1. 개요

복합 환경-에너지 관리 시스템의 효과를 현장 실험으로 평가하기 위해서 경기도 화성시 우정읍에 소재한 비닐온실에서 작물 생육 실험을 수행하였다. 시험 작물은 해당 비닐 온실 농가에서 기존에 재배해온 작물인 심비디움으로 선정하여 시험을 수행하였다. 전체 온실은 약 5000 m² 규모였으나, 실제 시험을 위한 재배 공간은 시험구와 대조구를 각각 1000 m²로 선정하였고 캐시미론 보온재와 온실용 비닐을 이용하여 시험 공간들을 독립시켰다.

시험구 온실과 대조구 온실에 각각 100주의 심비디움을 넣고 2011년 8월 31일부터 2012년 1월 29일까지 약 5개월간의 생육 조사를 수행하였다. 하지만 현장 평가용 복합 환경-에너지 관리 시스템의 개별 장치 개발과 설치가 늦어지게 되어 실제 처리를 해준 시기는 2011년 12월부터 2012년 2월까지 약 3개월간 이었다. 입주된 심비디움의 모습은 그림 160에서 보는 것과 같다.

환경 제어 조건은 야간 온도 15℃, 주간 온도 27℃로 하였으나 대형 온실과 시스템의 불안정에 의하여 2~3℃ 정도의 온도 차이는 발생하였다. CO₂공급은 오전 7시부터 11시까지 1300 ppm으로 수행하였고 보광은 자정부터 새벽 6시까지 작동시켰다.



그림 160. 현장 온실에서의 생육 평가를 위한 심비디움 입주 모습

2. 작물의 생육 개선 효과

입주된 심비디움의 상태는 다음 표 48에서 보는 것처럼 초장과 엽수가 각각 71.7 ~ 75.0 cm, 10.4 ~ 10.9 개였고, 꽃대수는 시험구와 대조구가 동일하게 4개씩이었다.

표 51. 현장 온실에 입주된 심비디움의 생육 상태 (조사일 :2011. 8. 31.)

시험구					대조구				
초장 (cm)	엽수	별브폭	별브높이	꽃대수	초장 (cm)	엽수	별브폭	별브높이	꽃대수
75.0	10.9	40.1	10.3	4	71.7	10.4	38.3	10.3	4

생육 조사는 처리구와 대조구가 따로 조사되었는데, 이는 시스템 운영상의 문제가 발생하여 처리구 생육 조사가 일찍 이루어지게 되었다. 처리구 온실의 생육 결과를 표 49에서 보는 것과 같이 초장이 69.2 cm, 엽수가 9.6개, 꽃수는 38.9개였고, 개화율은 30.7% 였다. 반면에 대조구 온실의 생육 결과는 표 50에서 보는 것과 같이 초장이 68.7 cm, 엽수가 9.1개, 꽃수가 41.3개였고 개화율은 37.3% 였다. 초기 생육 상태와 비교하였을 때 꽃대수는 초기 4개에서 처리구는 3.8개, 대조구는 3.7개로 줄어들었다. 이는 생육 과정에서 초기에 생성된 꽃대가 모두 정상적으로 성장하지는 못한 것으로 해석할 수 있다. 처리구의 경우가 대조구보다 꽃대의 생존에서 더 좋은 결과를 보였다. 하지만 꽃수의 경우는 오히려 처리구 쪽이 더 나왔고, 그 외의 생육 결과는 큰 차이를 보이지 못하였다.

표 52. 현장 온실의 처리구 심비디움 생육 결과 (조사일 :2012. 1. 09.)

초장 (cm)	엽수	별브폭	별브높이	꽃대수	꽃 수	개화 수	개화률	L	a	b
69.2	9.6	37.59	9.4	3.8	38.9	10.1	30.7	50.54	9.35	11.74

표 53. 현장 온실의 대조구 심비디움 생육 결과 (조사일 :2012. 1. 29.)

초장 (cm)	엽수	별브폭	별브높이	꽃대수	꽃 수	개화 수	개화률	L	a	b
68.7	9.1	36.1	8.0	3.7	41.3	15.6	37.3	49.1	7.9	13.4

3. 환경 제어 결과

처리구 온실과 대조구 온실의 온도와 습도의 변화는 그림 161과 같다. 처리구와 대조구는 모두 야간 온도가 15 ~ 16°C에서 조절 되었는데 대조구의 경우가 다소 낮았다. 주간 온도가 올라갈 경우 처리구 온실의 경우 온실 내부 열에너지를 FCU를 이용하여 회수하였기 때문에 창개방이 이루어지지 않았던 반면에 대조구 온실의 경우 창 개방에 의한 환기를 통하여 온도를 떨어뜨렸다. 따라서 습도의 경우 처리구의 경우 50% 이상을 유지할 수 있었으나 대조구의 경우 40% 수준까지 떨어졌음이 확인되었다. 따라서 복합 환경-에너지 제어를 수행한 온실에서 식물 생육에 더 적합한 환경에 조성되었다고 평가된다.

또한 처리구 온실의 경우 CO₂ 공급이 수행되어 오전 7시경부터 CO₂ 농도가 상승하기 시작하여 오전 8 ~ 10시 에 1000 ppm 이상을 유지하였고 오후 12시까지 높은 농도를 유지하였다. 처리구 온실의 CO₂ 농도 변화는 그림 162에서 보여지는 것과 같다.

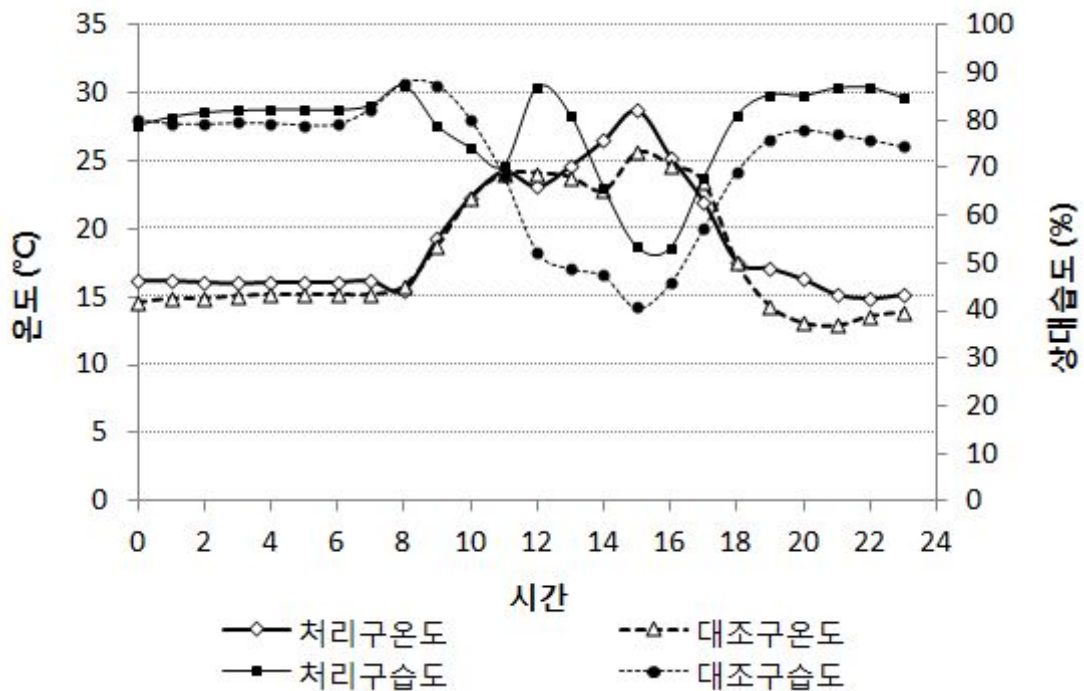


그림 161. 처리구 온실과 대조구 온실의 환경제어 결과 비교 (2012년 3월 17일)

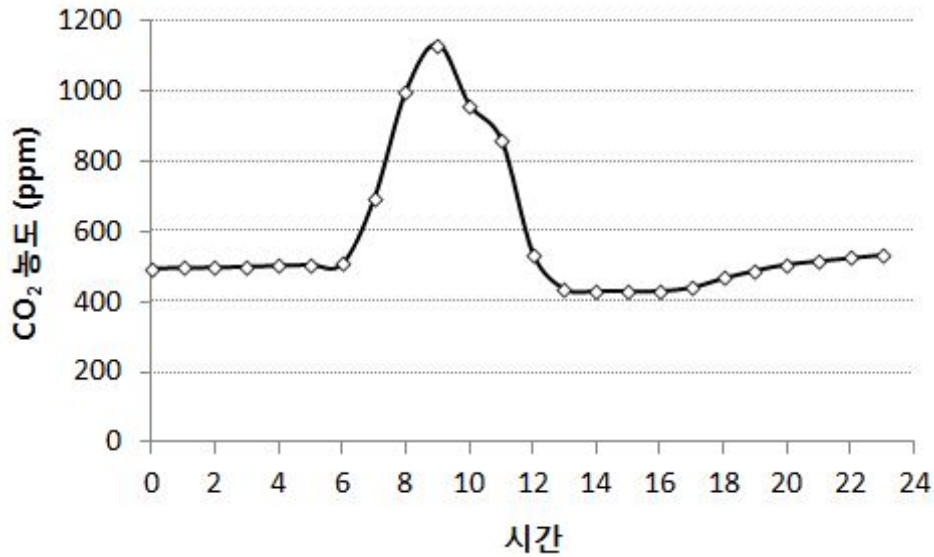


그림 162. 처리구 온실의 CO₂ 농도 변화 (2012년 3월 17일)

환경 제어 결과는 경기도 농업기술원의 100 m² 규모의 유리온실에서 수행한 결과에 비해 정확도가 떨어지는 것으로 확인되나 현장 규모의 온실에서 엄격한 제한이 없이 수행한 실험이라는 것을 고려해 볼 때 현장 실험에서 보여준 환경 제어의 결과는 복합 환경-에너지 관리 시스템의 현장 적용에 무리가 없음을 보여 주는 것이라 하겠다.

4. 복합 환경-에너지 관리 온실의 현장 실험에 따른 경제성 평가

현장 실험이 종료되었던 시점인 2012년 3월 12일부터 26일까지의 일별 에너지 사용량을 확인해 보면 표 51과 같다. 복합 환경-에너지 관리 온실에서 사용하는 에너지는 전기와 LPG이고 관행온실에서 사용하는 에너지원은 경유와 전기이다. 일별 비용은 복합 환경-에너지 관리 온실의 경우 15,000 ~ 24,000원으로 산출되었고, 관행 온실의 경우 16,000 ~ 43,000 원으로 산출되었다. 따라서 복합 환경-에너지 관리 기술을 활용할 경우 비용 절감 효과가 최대 44.9%까지 나타나는 것으로 평가되고 평균 비용 절감 효과는 28.3%이다.

표 54. 복합 환경-에너지 관리 온실과 관행 온실의 에너지 사용량 현장 평가

날짜	복합 환경-에너지 관리 온실			관행 온실			비용절감
	전기 (kWh)	LPG (kg)	비용 (원)	경유 (L)	전기 (kWh)	비용 (원)	
2012-03-12	369.1	2.1	15948	9.4	468.0	21276	25.0%
2012-03-13	251.6	3.8	14939	8.4	468.0	20296	26.4%
2012-03-15	267.1	7.5	22646	7.4	469.1	19344	-17.1%
2012-03-17	254.1	3.2	13851	4.7	468.0	16777	17.4%
2012-03-18	223.1	7.8	21616	21.4	468.0	32670	33.8%
2012-03-19	255.8	7.8	22808	22.2	468.0	33381	31.7%
2012-03-20	253.3	7.1	21346	26.3	468.0	37319	42.8%
2012-03-21	262.3	7.1	21711	6.4	468.0	18428	-17.8%
2012-03-23	248.7	7.9	22658	30.3	469.1	41138	44.9%
2012-03-24	270.8	7.9	23466	17.6	468.0	29024	19.2%
2012-03-25	289.3	7.9	24064	32.4	468.0	43131	44.2%
2012-03-26	287.9	7.6	23477	22.6	469.1	33816	30.6%
합계	3233.0	77.7	248531.8	209.3	5619.1	346600	28.3%

2012년 2월과 3월의 전체 비용을 평가해 보면 표 52와 같다. 복합 환경-에너지 관리 온실의 전기 사용량은 히트펌프, 순화펌프/팬, 보광으로 구별하여 각각 사용합을 계산하였고, 관행 온실의 기름 사용량은 실제 산출된 사용량에서 복합 환경-에너지 관리 온실과 관행 온실의 온도 제어 조건의 비율로 환산하여 계산하였다. 표에서 보는 것과 같이 복합 환경-에너지 관리 온실의 경우 현장에 적용할 경우 LPG 사용량이 가장 많이 발생하는 것으로 확인된다. 비용 절감 효과는 2월에 22.1%, 3월에 11.7%로 계산된다. 3월에 비용 절감 효과가 줄어드는 원인은 CO₂ 공급을 위해 사용한 LPG의 비용에 의한 것으로 LPG 비용이 가장 크게 소요되는 현장에서 난방 요구량이 작거나 필요 없는 조건에서는 CO₂ 공급에 의해서 에너지 절감 효과는 떨어질 수 있음을 보여준다.

표 55. 월별 에너지 사용량과 비용 평가

		2012년 2월		2012년 3월	
온실구분	에너지구분	사용량	비용환산(원)	사용량	비용환산(원)
복합 환경-에너지 관리 온실	히트펌프 (kWh)	3384.4	123191	3736.8	136018
	펌프/팬 (kWh)	568.2	20684	460.4	16758
	보광 (kWh)	4025.4	105868	4024.7	105849
	LPG (kg)	190.8	362442	185.6	352557
	합 계		612184		611183
관행 온실	기름 (L)	451.3	428697	352.8	335116
	전기 (kWh)	13585.7	357304	13583.3	357241
	합 계		786001		692357
비용 절감			22.1%	11.7%	

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

1. 연도별 연구목표 및 달성도

구분 (연도)	세부과제명	세부연구목표	달성도 (%)	연구개발 수행내용
1차 연도 (2009)	에너지 절약형 환경관리기 계 개발 및 성능평가	기초 개념설계	100	◦ 복합온실환경에너지관리를 기준으로 각 기계의 제어방법 및 제어로직 결정
		온실내 잉여 공기열 이용한 온실용 하이브리드 히트펌프 시스템 개발	100	◦ 저온(5℃ 이상)의 열원에서 효율적 작동 ◦ 온실 내부의 온도차를 이용 ◦ 지하수의 열을 이용 ◦ LPG난방 겸 이산화탄소 공급기와 통합 ◦ 유비쿼터스 시스템과 연계 ◦ 경량, 염가형 온실용 열교환기 개발 (동관을 알루미늄관으로 대체하여 경량화하고 가격을 낮춤)
		LPG연소식 CO ₂ 발생기 개발 및 실험실 성능평가	100	◦ 기존 연소형 이산화탄소 공급기의 단점을 보완하여 LPG 난방 겸 이산화탄소 공급기 하드웨어 구성. - 이산화탄소 이외의 가스는 차단 - 시설내 산소 이용 방지 - 난방열 및 이산화탄소의 시설 내 유입량 조절 ◦ 온실의 면적, 작물의 종류, 재배시기 등을 고려한 LPG 난방 겸 이산화탄소 공급기 제어로직 개발
		복합온실환경에너지관리 제어 및 통신시스템 개발	100	◦ 자연에너지 기술에 대비한 유비쿼터스 시스템의 통신 프로토콜 개발 ◦ 하이브리드 히트펌프, LPG 난방 겸 이산화탄소공급기와 연계된 복합온실환경에너지 제어부 보완
		복합환경에너지관리 통합 시스템 설계	100	◦ 복합환경에너지관리 통합시스템 설계
2차 연도 (2010)	에너지절약 형 환경관리기 계 개발 및 성능평가	개별 장치의 온실 설치 및 시스템 성능 평가	100	◦ 동절기 및 하절기 성능시험 (성능계수 평가, 경제성 평가) ◦ LPG난방시스템의 효과 분석(CO ₂ 품질 및 경제성) ◦ 히트펌프 성능평가(정량적): 히트펌프 자체 COP 및 실질 COP 측정

		관행 방식 운영의 유리온실과 복합환경에너지관리 온실의 에너지 및 환경비교 분석	100	<ul style="list-style-type: none"> 유비쿼터스 복합온실환경에너지 관리시스템의 성능 평가 기존 유리온실과 복합온실환경에너지 관리 온실의 에너지 및 경제성 비교
		에너지 절약형 환경관리기 계설비의 보완	100	<ul style="list-style-type: none"> 동·하절기 운영을 통한 기술 및 운영방식의 문제점 분석 개별 장치 및 시스템의 개선 효과 분석에 따른 성능개선, 안정성 확보기술 개발 지하수 열량 부족 및 초과시 대책 수립(예비탱크 설치 등 고려)
		현장접목 농가의 연중 에너지 및 환경 분석	100	<ul style="list-style-type: none"> 현장 온실의 계절별 온도특성 분석 현장 온실의 에너지 요구량 분석 온실 환경에서 온습도 측정 오류 현장 평가 및 오류 수정 대책 마련
		복합장치의 경제성 평가	100	<ul style="list-style-type: none"> 하이브리드히트펌프, CO₂ 발생기 전기 히터의 개별 가격, 통합가격 평가 운영 경제성 평가
	복합환경에너지 관리 시스템의 효과 검증	기존 유리온실과 복합환경에너지관리 온실의 작물재배 특성 분석	100	<ul style="list-style-type: none"> 시험작물 : 분화장미 등 처리내용 : 관행제어방식, 복합환경에너지 제어방식 주요조사항목 : 온도, 습도, 난방비, 생육특성, 경제성분석 등
3차년도 (2011)	에너지절약형 환경관리기 계 개발 및 성능평가	여름철 냉방 수행 및 성능 평가	100	<ul style="list-style-type: none"> 여름철 주간 냉방을 수행과 동시에 고농도 CO₂ 공급 에너지 사용량 평가 효율적인 운영 방안 마련
		비닐하우스에서 복합환경에너지관리의 에너지 절약 및 투입량 감소 효과 구명	100	<ul style="list-style-type: none"> 농가용 비닐 하우스(1000m²) 용 시스템 개발 난방에너지량과 비용 분석 시스템의 안전성과 신뢰성 분석
		복합온실환경에너지관리시스템의 운영 기준 제시	100	<ul style="list-style-type: none"> 시스템 제어 방식 제시
		유사 기술과의 경제성 평가	100	<ul style="list-style-type: none"> 지열 히트펌프 온실 및 경유 난방 온실과의 냉난방 기술과의 경제성 비교 평가
	복합환경에너지 관리 시스템의 효과 검증	여름철 냉방 수행 및 작물 생육 평가	100	<ul style="list-style-type: none"> 냉방을 수행하지 않은 온실의 작물과 복합 환경 제어가 수행된 온실의 생육 효과 분석
	비닐하우스에서 복합환경	100	<ul style="list-style-type: none"> 시험작물 : 심비디움 	

		에너지관리의 작물생육 촉진 효과 구명	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 처리내용 : 연동 비닐하우스에서 구간을 나누어 개발된 시스템 적용 구간과 관행 구간 ◦ 주요조사항목 : 온도, 습도, 난방비, 생육특성, 경제성분석 등
--	--	----------------------	---

2. 관련분야의 기술발전예의 기여도

가. 온실 환경 제어 기술

지금까지 온실의 환경 제어 방식은 장치에 따른 개별 컨트롤러를 이용한 제어였다. 온도, 습도, 광, 이산화탄소를 모두 제어하는 복합 제어 온실도 있지만 대부분의 기술이 각각의 환경 요소 개별 장치를 위한 컨트롤러들과 환경 계측용 센서를 위한 컨버터들을 하나의 컨트롤 박스 안에 통합하는 수준이었다. 하지만 본 연구에서는 하나의 통합 제어 장치를 개발 하였고, 이 통합 제어 장치는 단일 회로로써 개별 기기의 제어와 환경 계측 뿐 아니라 데이터 통신 기능이 포함된 다른 시스템과도 연계하여 작동할 수 있는 기능을 포함한다. 따라서 온실의 환경 제어 기술을 강력하면서도 단순화하는데 기여했다고 판단된다. 더 나아가 향후 환경 제어를 위한 프로토콜들이 표준화 될 수 있다면 아날로그 제어 방식이 주를 이루는 온실 환경 제어 방식이 디지털과 데이터 통신 방식으로 발전 할 수 있을 것으로 기대 된다.

나. 냉난방 히트펌프

냉난방 히트펌프 기술에 대한 많은 연구들이 수행되었지만 현장에 활용되는 예는 아직 드물다. 그 원인은 냉난방 히트펌프의 방식 냉매의 흐름 변경 방식을 채택하면서 효율이 낮아지는 문제가 있기 때문이었고, 열원을 실시간으로 획득하려고 했기 때문이었다. 즉, 난방을 수행하려 할 때는 동일한 순간에 열을 공급해줄 열원이 필요하고, 냉방을 수행하려 할 때는 열을 방출할 수 있는 방열원이 필요하였다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 축열 방식의 냉난방 히트펌프 기술을 개발 하였다. 개발된 하이브리드 히트펌프 시스템은 고온 축열조와 저온 축열조를 이용하여 난방에너지와 냉방에너지를 동시에 확보하여 필요할 때 공급해주는 기술을 이용하였다. 특히 온실과 같이 난방부하 또는 냉방부하가 매우 큰 시설물의 경우 축열 구조가 아닌 실시간 냉난방 방식으로 갈 경우 히트펌프의 용량이 매우 커지게 되어 실질적으로 실용화에 한계가 있다.

열원의 경우에도 온실 내부의 열원을 활용하는 방식이기 때문에 지하수 또는 지열의 활용 가능 열량과 관계없이 적용할 수 있는 독창성이 있다. 또한 축열 방식의 히트펌프 시스템은 히트펌프 자체의 구조를 단순화 할 수 있기 때문에 내구성과 유지 보수의 편의성이 높아진다. 따

라서 본 연구에서는 냉난방 히트펌프 기술의 새로운 방식과 그 가능성을 검증해 주었다.

다. 연소식 CO₂ 발생기

연소식 CO₂ 발생기는 저렴한 비용과 난방을 동시에 수행할 수 있다는 장점에도 불구하고 여러 가지 문제점들로 인하고 활발하게 활용되지 못하고 있다. 그 문제점들에는 불완전 연소에 의한 독성가스 문제, 저온기에도 배기가스 열에 의해서 온실의 온도가 지나치게 상승하는 문제, 고온기에는 환기로 인하여 사용할 수 없는 문제(환기와 관련된 문제는 모든 CO₂ 발생기의 문제 임) 등이 있다. 본 연구에서는 이와 같은 문제를 해결하는 연소식 CO₂ 발생기를 개발에 성공하였기에 이 분야의 기술적 발전에 기여했다고 판단된다. 완전 연소의 여부를 연소실 온도를 기준으로 판단하였기 때문에 기술 적용 비용도 매우 저렴하다. 또한 히트펌프 시스템과 통합되어 저온기에도 배기가스 열을 효율적으로 활용할 수 있고, 고온기에도 환기없이 온실을 밀폐한 상태에서 이산화탄소 공급을 수행할 수도 있다. 따라서 온실용 이산화탄소 시비를 위한 CO₂ 발생기 부분의 동차적인 기술로 평가된다.

라. 인터넷을 이용한 원격 온실 관리 기술

인터넷을 이용한 온실의 원격 제어 기술들은 이미 상용화되어 시설원에 농가에 점차 보급되고 있는 추세이다. 하지만 본 연구에서는 인터넷을 이용한 원격 온실 관리 항목으로 에너지 관리를 포함하면서 기술적 진보를 이루었다고 판단된다. 사용하고 있는 에너지량을 실시간으로 원격에서 확인할 수 있고, 기록된 데이터를 바탕으로 시간별, 일별, 월별 에너지원별 사용량을 조회하고 비용으로까지 환산하여 농가에서 에너지 이용 및 경영 관리에 적극적으로 활용할 수 있도록 하였다. 또한 최근 급격히 확산되고 있는 스마트폰을 이용한 원격 관리를 가능하도록 함으로써 첨단 기술의 농업에 활동하는 기술적 기여도 하였다.

마. 복합 환경 제어에 따른 식물 생육 개선 기술

지금까지 식물의 생육을 평가할 때 여러 가지 환경 요소 중 단일 요소에 대한 영향만을 시험하고 평가하였다. 하지만 단일 환경 요소가 아닌 복합 환경을 작물에게 최적으로 조절해 주었을 때 식물 생육이 극대화 될 수 있을 것이라는 생각은 많이 되어 왔지만 이에 대한 실험과 검증은 아직 수행되지 못하였다. 본 연구에서는 복합 환경-에너지 관리 시스템을 기반으로 온도, 습도, 광, 이산화탄소를 모두 제어하면서 식물의 생육 개선 효과를 검증하였고, 결과로써 기존 온실 운영 방식에 비해 비약적인 생육 개선 효과가 있었음을 확인할 수 있었다. 따라서 식물의 생육을 개선하고 고품질 농산물을 개발할 수 있는 복합 환경 제어 조건을 제시해 줄 수 있는 기술에 크게 기여한 것으로 판단된다.

제 5 장 연구개발 성과 및 성과활용 계획

1. 연구 개발 성과

가. 논문게재 성과

논문 제목	게재년도	학술지명	통권/호 /페이지	비고
인터넷환경제어 온실의 환경데이터 분석	2009	한국농업기계학회 2009 하계 학술대회 논문집	14/2 /307-312	국내 학술대회
Comparison of Solar Radiation Shields for Dry Temperature Measurement in Greenhouse	2010	ISMAB2010		국제 학술대회
복사열과 풍속이 건구온도에 미치는 영향에 대한 실험적 연구	2010	한국농업기계학회 2010 동계 학술대회 논문집	15/1 /25-28	국내 학술대회
회수 가능 열에너지 활용 온실 시스템 설계	2011	한국농업기계학회 2011 하계 학술대회 논문집	16/2 /301-305	국내 학술대회
온실의 회수 가능 열에너지 저장 및 공급 제어 시스템의 설계	2012	한국농업기계학회 2012 동계 학술대회 논문집	17/1 /29-33	국내 학술대회
Heating and Cooling System for Utilization of Surplus Air Thermal Energy in Greenhouse and its Control Logic	2012	Journal of Biosystems Engineering	37/1 /19-27	학술진흥재단 등재지
Modeling of Solar Radiation Using Silicon Solar Module	2012	Journal of Biosystems Engineering	37/1 /11-18	학술진흥재단 등재지
Greenhouse Heating and Cooling System Using Surplus Air and Underground Water Thermal Energy with a Heat Pump System	2012	ISMAB2012		국제 학술대회

나. 특허 성과

출원등록명	출원번호	등록번호	출원일
저탄소 저비용 온실 에너지 관리 시스템	10-2009-0126542	10-1093777-0000	2009-12-18
온실용 탄산가스 발생 장치	10-2010-0131943	-	2010-12-21
온실용 냉난방 시스템 및 그의 냉난방 방법	10-2011-0125179	-	2011-11-28

다. 연구 인력 양성 성과

인력양성명	양성년도	양성대상수	양성기관
박사학위(공학박사)	2011	1	서울대학교 대학원

라. 정책제안 및 영농활용

제안명칭	주관부처	일자	기대효과	구분
복합온실환경에너지관리시스템을 이용한 에너지절감 및 상품성 향상 효과	농촌진흥청	2011.12.14	지역별 경유사용 절감율 40~100%	영농활용

2. 연구 성과 활용 계획

가. 기술 실용화

참여 기업 및 기술이전 희망 업체를 통한 제품 실용화를 진행할 계획이다. 실용화 가능한 기술로는 축열식 하이브리드 히트펌프 시스템, 연소식 CO₂ 발생기, 유비쿼터스 에너지 통합 제어 장치 등이 있다. 각각의 기술은 모두 특허 출원이 되어 지적재산권이 확보하였다. 현재 본 연구에 참여한 현대중부터미널에서 설비 부분을 담당하고, 농정사이버에서 소프트웨어 부분을 담당하는 상용화 계획을 갖고 있으며 세부 제작 업체들도 히트펌프의 경우 그린에너지스, 삼양 ENG 등의 업체와 기술이전 협의를 수행하고, CO₂발생기의 경우 삼일ENG, 에너지 통합 제어 컨트롤러는 수테크와 기술이전 협의를 수행할 계획이다. 본 연구에서 개발한 시스템은 대형 설비이기 때문에 다양한 제품들의 통합이 매우 중요한 만큼, 업체간 역할을 효과적으로 분배하여 실용화를 수행할 것임

나. 기술 확산 및 보급

협동 연구기관인 경기도 농업기술원과 정책제안 및 영농활용 제안을 제출하였고 농가대상 시연 및 생육 개선 홍보 등을 통하여 기술의 우수성을 알린다. 또한 경기도의 농가 시범사업을 시작으로 전국적인 보급 사업을 진행 할 계획이다. 기술 실용화 및 기술 확산의 절차 및 구상은 다음 그림 163과 같다.

본 연구에 직접 참여한 농가를 중심으로 초기 제품을 시범설치 운영할 농가들을 모집하면 상당수의 시범 농가를 확보할 수 있을 것으로 보인다. 특히 본 연구를 수행하는 동안 경기도 화성뿐 아니라 가평, 용인, 이천에 소재한 시설 원예 농가들과의 면담을 통하여 본 연구에서 개발한 기술에 대한 관심을 확인하였기에 기술 보급 거점 지역으로 활용하기 용이할 것으로 보인다.

다. 기술 교육

복합 환경 제어의 효과에 대한 기술 교육을 농가 및 농민 지도사를 대상으로 실시할 예정이다. 온도, 습도, 광, 이산화탄소 등의 환경 요소들을 단일 요소가 아닌 복합적으로 조절할 때 작물 생육 개선이 극대화 될 수 있음을 실증 자료를 바탕으로 교육한다.

라. 학술 논문 발표

수행한 연구의 내용은 국제적으로도 독창성이 확보된 내용으로 각종 SCI 저널 등을 통하여 논문을 발표할 계획이다. 현재 진행 중인 저널로는 Biosystems Engineering, Solar Energy, Applied Energy 등이 있다. 국내 저명 학술지인 Journal of Biosystems Engineering에는 이미 게재를 하였지만 향후 지속적인 논문 발표를 할 예정이다.

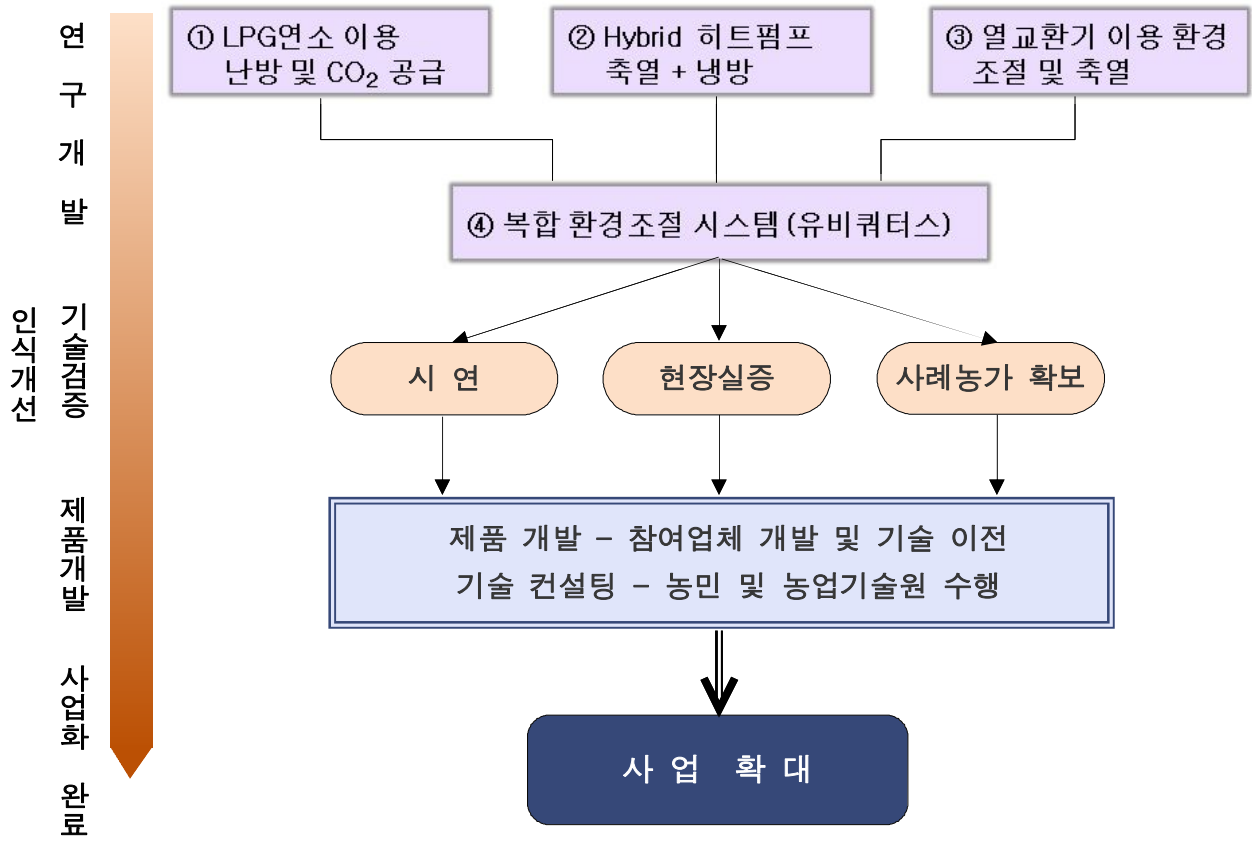


그림 163. 기술 실용화 및 기술 확산의 절차 및 구상

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

1. 온실 난방 부하 산출 프로그램

미국 농림부 (USDA)에서는 온실의 구조 및 재질에 따른 난방부하를 계산해 주는 프로그램을 개발하여 공개하였다. Virtual Grower라는 이름의 프로그램으로써 지속적인 업데이트를 하고 있으며 2012년 3월 14일 현재 ver. 3 까지 출시하였다. 웹사이트(www.virtualgrower.net)에서 다운 받을 수 있고, 영어, 불어, 스페인어를 지원한다. 프로그램의 화면 예는 다음 그림 164 과 같다.

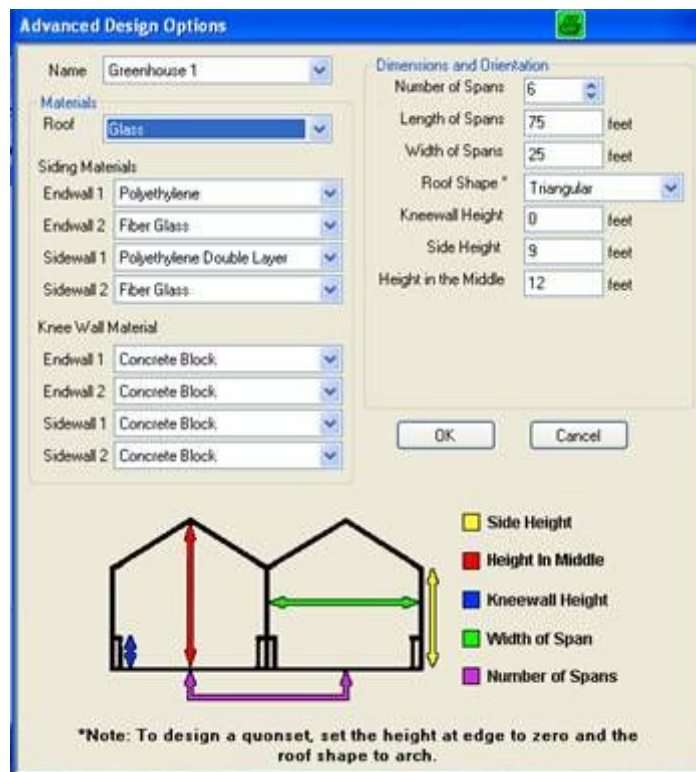


그림 164. Virtual Grower 프로그램 화면

2. 초대형 온실 에너지 관리 기술

네덜란드는 온실의 에너지 관리 기술면에서 세계적으로 크게 앞서 있다. 다음의 그림 165는 네덜란드 Wageningen UR 이라는 회사(www.wur.nl)에서 시공하고 있는 온실용 초대형 물 저장장치의 설계도이다. 온실을 하나의 영구 구조물로 간주하여 물탱크를 지하에 시공하고 온실의 운영 효율과 공간 효율을 극대화 하고 있다.

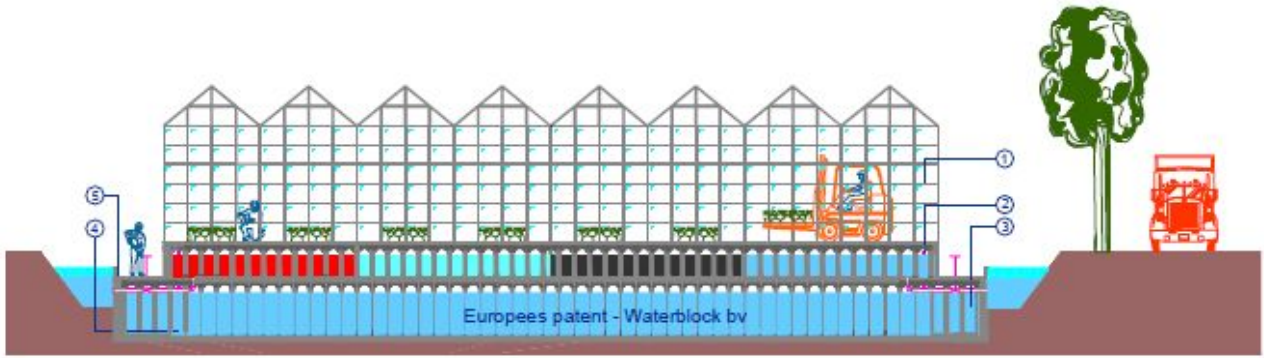


그림 165. 초대형 물탱크를 고려한 온실 설계 최적화

3. 지하 축열조 시스템을 이용한 온실 냉난방 에너지 절감 기술

네덜란드의 Innogrow 사(www.innogrow.nl)는 GeslotenKas[®]라는 이름의 지하에 축열조를 설치하여 냉난방 에너지를 절감할 수 있는 완전 폐쇄형 온실 기술을 시공하고 있다. 그 구조는 다음 그림 166과 같다. 히트펌프와 저온, 고온 축열조를 지하에 설치하고 열교환기를 통하여 열을 주고 받는다. 30 ~ 40%의 에너지 절감 효과가 있는 것으로 발표하고 있다.

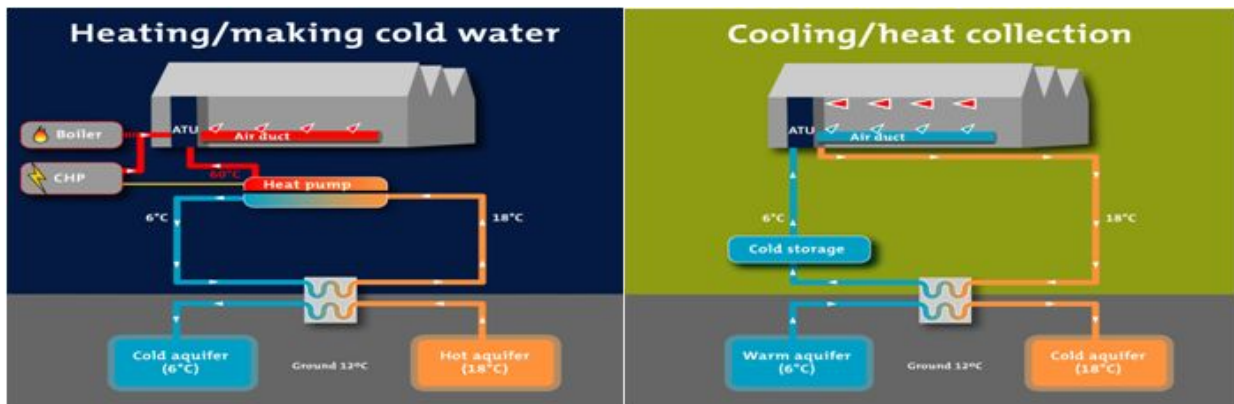


그림 166. Innogrow 사의 지하 축열조 방식의 냉난방 시스템

4. 해외 관련 학술 논문 요약

년도	제 목	주요 내용 요약	대표저자	소속/학과(부서)	논문집
1970	The transmission of diffuse light by a sloping roof	직달 일사가 아닌 확산 일사를 포함한 경사 온실 피복재의 광 투과율 조사 경사면에 따른 맑은날, 흐린날의 광 투과율(유리, 아크릴) 명시됨	G.E.Bowman	NIAE, Silsoe	J. agric. Engng Res
1985	Radiation transfer through covering materials, solar and thermal screens of greenhouses	지구의 파장별 광 투과율 및 반사율 계산 태양고도, 방위를 이용한 맑은날, 흐린날, 열복사에 대한 광량 계산 온실의 피복재별 광 투과율, 반사율, 흡수율 차광스크린, 보온스크린에 대한 조언	J. Nijskens	Research centre on Energy Saving in Protected Cultivation / Faculty	Agric. and Forest Meterology
1999	Influence of covering material and shading on the spectral distribution of light in greenhouse	온실의 재질별, 형태별 광 투과율 조사 광질에 따른 분석 : PAR, NIR, TOTAL(PAR+NIR) 맑은날 11:00~13:00 평균 투과율 실측	C. Kittas	University of Thessaly / Agri. crop & animal production	J. agric. Engng Res
1983	A computer model to calculate the daily light integral and transmissivity of a greenhouse	온실의 치수와 태양 위치를 고려한 온실 내부로 들어오는 에너지 계산, 다른 연구자들의 모델을 도입 구조물에 의한 광 감소는 피복재와 구조물의 비율로 산출 4연동 벤로형 유리온실로 검증 : 실측값보다 15% 높게 나옴 -> 광 손실을 3% 증가시켜 보정함.	D.L.Critten	NIAE, Silsoe (NationalInstituteofAgriculturalEngineerin g)	J. agric. Engng Res
1985	The effect of house length on the light transmissivity of single and multispan greenhouses	Single, Multi-span의 온실에서 span length에 따른 투과율 비교 (3Dcomputermodelvs.Schulze'sphysicalmodel) 3,6,12월 21일 기준에서 평가 + 맑은날, 흐린날 * Distance from centre/span 이 뭐지?	D.L.Critten	NIAE, Silsoe	J. agric. Engng Res
1985	A theoretical assessment of	Symmetric Roof 와 Vertical Roof 온실의 광투과율	D.L.Critten	NIAE, Silsoe	J. agric. Engng

	the transmissivity of conventional symmetric roofed multispans E-W greenhouse compared with vertical south roofed greenhouse under natural irradiance condition	비교 symmetric/antisymmetric radiation function, sun radiation 조사 계절별 조사, 단일층/복층 유리피복 겨울철, VR온실이 SR보다 5% 광투과율 향상, 봄가을철은 약간 향상, 이중유리의 경우 SR 7%, VR 5% 하락			Res
1987	The transmissivity of E-W aligned models of a conventional and clerestory greenhouse under natural winter irradiance	소형 7연동 유리온실 모델을 통한 Symmetric Roof와 Vertical Roof의 광투과율 비교 Diffuse/Direct light 비교, 컴퓨터 모델과 실측값의 비교 구조물 그늘 현상을 소형 불투명 파이프를 구현함 측정된 평균 광투과율 : SR 0.77, VR 0.81	D.L.Critten	NIAE, Silsoe	J. agric. Engng Res
1998	Solar radiation transmissivity of a single-span greenhouse through measurements on scale models	Acryl로 만든 소형 온실 (40x80cm) 실험의 실측 (맑은날) 바닥면에 48개의 solar cell을 깔아서 측정 E-W, N-S 방향, 방위각에 따라, 여름-겨울에 따른 광투과율 측정 직달일사에 대한 광투과율 산출(전천일사, 직달일사 -> 산란일사 산출, 각각의 투과율 산출) 투과율은 평균 0.85 이상, 1이하로 측정됨, 입사각에 따라 0.7 이하도 있음	G.Papadakis	Agri. Univ. of Athens /Engr.Dep.	J. agric. Engng Res
1998	A model greenhouse for testing the role of condensation, dust and Dirt on the solar radiation transmissivity of greenhouse cladding	PC재료를 이용한 모형 온실 실험(6x1.2m) UV차단, anti-drop처리면, dry/wet 상태 등 8가지 피복재에 대한 실험 18개월 후 광투과율이 dry 73->60%, wet 77->62% 까지 떨어짐	F.Geoola	Institute of Agricultural Engineering / ARO	J. agric. Engng Res

	materials				
1996	Temperature reduction inside a greenhouse	지하 공기터널을 이용한 공기 냉각 및 온실 냉방 주변환경(dry, wet, sunlit, shaded)에 따른 열수지 분석으로 지하 공기온도 산출 : wet & shaded = 17°C, dry & sunlit = 30°C	Roy F. Sutar	Indian Institute of Technology / Energy study	Energy
1997	Real-time parameter estimation of dynamic temperature models for greenhouse environmental control	에너지수지가 아닌 input & output 통계치리로 온실내부 온도모델 개발 고려한 변수 : 외기 온도, 일사, 풍속, 내부 습도, 환기, 난방 210m ² PE온실, 외부환경은 지상 2m 지점에서 측정 에러 편차 : 0.21, 0.29 °C (실험온실, 가을철에 국한된 모델임) >>환경 컨트롤에 이용하고자 하는 최종 목표	J. Boaventura Cunha	Univ. de Tras-os-Montes / engenharias	Control Eng. Practice
1999	Temperature distribution in different zones of the micro-climate of a greenhouse: a dynamic model	소형 단동 온실을 이용한 온실내의 온도분포 모델링 온실의 다양한 요소를 고려하여 수식 작성 모델과 실측값이 비슷한 경향을 보이는 수준임 (특히 겨울에는 틀림)	P.K.Sharma	Centre for Energy Studies	Energy Conversion & Management
2000	Direct solar radiation penetration into row crop canopies in a lean-to greenhouse	소형 단동 온실과 가상 식물, 인공광을 이용한 광투과량 조사 E-W,N-S동 온실, 북위 25, 45, 55도, 월별 실측 40~60% 수준에서 각기 다른 실험 결과 도출	S. Li	Univ. of Tokyo / Bio. and Env. Engin.	Agricultural and Forest Meteorology
2000	Greenhouse daily sun-radiation intensity variation, daily temperature variation and heat profits through the polymeric cover	PE 피복재 단동 아치온실의 광투과, 온도 변화 측정 겨울철 맑은날, 흐린날 데이터 제공 온도 : 8~18°C(맑은날), 14~22°C(흐린날) 광투과 : 0.25~0.56(맑은날), 0.6~1.0(흐린날)	Georgios Leonidopoulos	Kilkis	Polymer Testing
2003	Modelling greenhouse	Extent auto regressive models with external	H. Uchida	Ghen Univ. /	Biosystems

	temperature by means of auto regressive models	input (ARX)와 Autoregressivemovingaveragemodelswithexternalinput(ARMAX)를 이용한 온실의 온도 모델링 (18개의 계수를 이용해 r^2 0.8~0.9확보)	Frausto	Biosystems engineering	Engineering
2008	Effect of air density variations on greenhouse temperature model	수분에 따른 공기 밀도를 고려하여 온실의 온도 모델링 실험온실 : 토마토, PE피복 4연동 아치형 온실 1000m ² 공기밀도를 고려하였을 때 : 약 0.5'C 온도 오차를 줄일 수 있음 온실 열관계 방정식들이 매우 잘 정리되어 있음	Javier leal Iga	Univ. Regiomontana	Mathematical and Computer modelling
2008	Effect of wind direction on greenhouse ventilation rate, airflow patterns and temperature distributions	CFD 이용한 시뮬레이션 N-S4연동 아치 온실 풍향에 따라서 E-W 방향의 3~4 'C 온도 차이가 발생한다	M. Teitel	Agricultural Engineering Institute	Biosystems Engineering
2009	Effects of cover diffusive properties on the components of greenhouse solar radiation	지붕면적이 매우큰 온실에서 total, direct-direct, direct-diffuse, diffuse-diffuse 광투과율에 대한 조사 (5년간의 데이터 취합) diffuse-diffuse의 경우 3이상의 투과율도 존재한다. direct-diffuse광투과율은 다른 경우와 반대로 증감한다. 입사각에 의한 광투과율 변화도 제시되어 있음 대략적인 광투과율은 0.5 ~ 0.7 수준임 온실의 광투과에 대한 종결 논문	F.J.Cabrera	Autovia del Mediterraneo	Biosystems Engineering
1987	Light transmission losses due to structural members in multispans greenhouses under diffuse skylight	온실의 구조물을 원형바로 가정하고 그늘 효과를 이론과 실측으로 규명함 3단계로 분석 : weight-bearing, glazing bar, completion	D.L.Critten	NIAE, Silsoe	J. agric. Engng Res

	conditions	이론 광손실 - Simpson multispans(34%), Venlo multispans(36%), Robinsons multispans(33%)			
1987	Light transmission losses due to structural members in multispans under direct light conditions	자연광 조건에서 정확한 실험 검증은 어렵다. 하루동안의 광손실을 이론적으로 제시함 (광유효면적 vs. 구조물면적)	D.L.Critten	NIAE, Silsoe	J. agric. Engng Res
1984	CO2 enrichment of greenhouse tomatoes using a closed-loop heat storage: effects of cultivar and nitrogen	겨울철 환기 횟수가 줄어들어 따라 CO2공급이 필요함 포그냉방 및 태양광 암면 축열을 통하여 CO2공급시간을 늘려줌 : 겨울철 11시간, 여름철 4시간 액화탄산가스 이용	M.M.Peet	D. of Horticultural Science and Biological and Agricultural engineering	Scientia Horticulturae
1987	Factors affecting the performance of rockstorages as solar energy collection/storage systems for greenhouses	암석 열저장 효과 : 54.8 ~ 143.3 MJ/m2 CO2공급 시간 비율 : 64.3%(봄), 100%(겨울) 열료절감은 외기온도, 태양에너지에 따라 비선형으로 나타난다. CO2공급 시간 비율은 외기온도, 태양에너지가 클수록 줄어든다.	D.H.Willits	D. of Horticultural Science and Biological and Agricultural engineering	Transactions of the ASABE
1996	Catalytic removal of NOx from total energy installation flue-gases for carbon dioxide fertilization in greenhouse	에너지 절감 측면에서 LNG보일러(lean-burn engine) 연소가스를 탄산가스로 이용 높음 NOx 농도가 문제가 되어 Delft NOx/urea process(300-400°C 온도조건 필요)를 이용하여 촉매 분해 => N2 + H2O NOx는 90%변환, CO와 에틸렌은 산화 촉매를 이용하여 99, 98% 이상씩 제거함	P.M.Lugt	Chemical Technology and Materials Science (Netherlands)	Catalysis Today
1996	CO2 optimization in the glasshouse tomato	연료 연소시 열을 저장한다면 CO2 공급은 비용이 들지 않는 것과 같음	D.P.Aikman		ISHS Acta Horticulturae
2008	Greenhouse cooling and carbon dioxide fixation by	CO2공급과 냉방을 결합한 새로운 전략 냉방 : 포그, 전창환기	U.Schmidt		ISHS Acta Horticulturae

	using high pressure fog systems and phytocontrol strategy	700ppm			
2007	Evaluation of combined application of fog system and CO2 enrichment in greenhouses by using phytomonitoring data	주간에 포그 냉방은 환기 창개방을 줄여서 높은 CO2를 유지하게 해줌	U.Schmidt		ISHS Acta Horticulturae
1992	A generalized optimization strategy for dynamic CO2 enrichment in a greenhouse	CO2 공급(광합성 흡수, 환기 손실)의 일반식을 유도함 작물 생육기간, 광, CO2 농도에 따른 변동 발생	Z.S.Chalabi	AFRC Institute of Engineering Research(UK)	Theory and Methodology
2002	Optimal control strategies for carbon dioxide enrichment in greenhouse tomato crops - part 1: Using pure carbon dioxide	CO2 공급에 관련된 비용과 작물 증체로 인한 소득 증대 상이의 이득 분석 CO2농도 관여 요소 : 태양복사, 풍속, 환기 환기의 요소 : 바람방향, 바람반대방향, 누수 효과 수식에 대한 영어 표현 참고 문헌으로 좋음 계절별 CO2 공급 운영 결과가 잘 정리되어 있음	Z.S.Chalabi	AFRC Institute of Engineering Research(UK)	Biosystems Engineering
2002	Optimal control strategies for carbon dioxide enrichment in greenhouse tomato crops - part 2: Using the exhaust gases of natural gas fired boilers	LNG보일러를 이용한 CO2공급시 토마토 재배 손익 분석 CO2를 온풍으로 공급할 때, 연소열을 저장할 때 - 저장하지 않을 때, CO2를 공급하지 않을 때 각각의 비교, 계절별 특성 비교 열저장 없이 이용할 때 11%이득, 열저장을 하면 24% 이득	Z.S.Chalabi	AFRC Institute of Engineering Research(UK)	Biosystems Engineering
2004	On the study of an energy-efficient greenhouse for heating, cooling and dehumidification applications	온실에서 발생하는 모든 에너지 수지의 시뮬레이션 (공기열 히트펌프 시스템적용, 주간 28°C, 야간 18°C 기준) 에너지 수지에 관한 이론 수식의 정리가 잘 되어 있음	S.K. Chou	National University of Singapore / Mechanical Engineering	Applied Energy

		<p>누수/환기에 의한 에너지 교환(외기 상태 포함)이 다른 부분보다 우월함</p> <p>히트펌프 설계시 콤프레셔보다 응축기 8배, 증발기 10배 용량이 적합</p>			
2009	<p>Evaluation of ground-source heat pump combined latent heat storage system performance in greenhouse heating</p>	<p>지열히트펌프(R-22)와 잠열축열(propylene glycol sol.)을 이용한 온실 난방</p> <p>지하 2m에 수평 지열파이프(PE) 45m 매설, 축열탱크 330 L, 온실 30 m²</p> <p>COP_{hp}=2.3~3.8, COP_{sys}=2.0~3.5</p> <p>히트펌프가 밖에 있을 때, 영하 기온에서 갑작스런 온도 하락 발생</p>	Huseyin Benli	Firat Univeristy / TehcnicalEducation	Energy and Building
2009	<p>On the selection of shape and orientation of a greenhouse: Thermal modeling and experimental validation</p>	<p>5개 온실 형태 비교: even-span, uneven-span, vinery, modified arch, quonset</p> <p>일사량 예측 : 위치, 계절에 따른 수식 적용, 선행 연구에 따른 투과율 적용, 온실 피복면(6면)을 각기 계산</p> <p>거의 정상상태고 가정하고 시뮬레이션 수행, 방위별, 월간태양복사에너지량 산출</p> <p>온도측적은 그늘 아래서 수행</p> <p>여름철 맑은날 온도 모델링 수행 (외기 약30°C에서 온실온도 45 ~ 50°C)</p>	V.P. Sethi	Punjab Agricultural University / Mechanical Engineering	Solar Energy
2007	<p>Thermal modeling of a greenhouse integrated to an aquifer coupled cavity flow heat exchanger system</p>	<p>고랑(2~4m 깊이)을파고, 지하수를 이용하여 온실 공기 냉각/가열 후 순환 기술</p> <p>목표 온도 : 여름철 외기의 -7°C 겨울철 외기의 +20°C</p> <p>온도측적은 그늘 아래서 수행</p> <p>온도 모델링을 위한 상세한 파라미터를 이용한 예실측결과 여름철은 예상보다 조금 높은 온도, 겨울철</p>	V.P. Senth	Punjab Agricultural University / Mechanical Engineering	Solar Energy

		은 조금 낮은 온도 확인			
1994	Transient analysis of naturally ventilated greenhouse with built-in solar still and waste heat and mass recovery system	굴뚝형 온실의 자연 환기시 basin-water를 흘러 열과 수분을 회수함 :내용은 별것 없음	Fath	Alexandria University /Engineering	Energy Conversions
2001	A strategy for greenhouse climate control, Part I: Model development	소요비용-생산량(소득) 최적화를 위한 모델 개발 :냉방, 난방, CO2, 제습 사용한 수식과 수식을 제시한 참고문헌이 잘 정리 되어 있음	Trigui	McGill University /AgriculturalandBiosystemsEngineering	J. agric. Engng Res
2001	A strategy for greenhouse climate control, Part II: Model validation	Venlo 유리온실(히트펌프 제습기, 보광, 보온스크린, 포그냉방, CO2공급기) 기록한 데이터(온도:공기,유리,채소,토양; 입사광량, 상대습도; CO2농도)를 바탕으로 선택한 모델에 대한 regression을 통한 계수확인 작물의 가격 모델은 Hamiltonian function 이용 1일 모델은 틀리지만 1주일, 1달 모델은 CV 1~8% 수준에서 일치함 일사량과 작물의 호흡사이에는 시간차가 발생함	Trigui	McGill University /AgriculturalandBiosystemsEngineering	J. agric. Engng Res
1991	High-power gas-discharge lamps as heating elements of radiant heating units	Lamp : Xenon-filled tubular ac gas-discharge water cooled lamp (Model : DTP-10/200. DTP-10/500) 반사판의 형태에 따른 열유속밀도(heat flux density) 측정 :elliptical(균일)>rectangluar>trapezoidal>flat>nothing	B.B.Petrikevich	N.E. Bauman moscow state technical university	Experimental Thermal and Fluid Science
2009	Energy and exergy analyses of space heating in buildings	비교대상 : LNG일반보일러, LNG콘덴싱보일러, Air-air 히트펌프 열이득 요수 중 컴퓨터, 냉장고, 복사기, TV 등이	Abdullah Yildiz	Ege University / MechanicalEngineering	Applied Energy

		<p>있다는 언급 최대 input energy -> LNG일반보일러; 최소 -> Air-air 히트펌프(에너지 생성) 최대 energy loss -> 최초 에너지 변환시 발생 최대 exergy loss -> 난방장치(연소시)에서 발생 단순 입력 전력으로 에너지 절감을 예상하면 과대평가된다.</p>			
1991	Considering lighting system performance and HVAC interactions in lighting retrofit analyses	<p>메립형 형광등의 난방, 냉방 부하 관련 효과(열량절감, 비용절감) 확인 냉방부하로 90%, 난방부하절감 20%로 산출됨</p>	Ellen Franconi	University of California Berkeley / Lighting systems	IEEE-IAS conference
1984	Determining lamp/ballast system performance with a temperature-controlled integrating chamber	<p>40W, 35W 형광등을 이용한 주변 온도에 따른 효율 비교 논문 최저 전구벽 온도가 35~37°C 일때 최고 효율</p>	M.J. Siminovitch	University of California Berkeley / Lighting systems	Illuminating Engineering Society

제 7 장 참고문헌

- Abdel-Ghany, A. M. and I. M. Al-Helal. 2011. Solar Energy Utilization by a Greenhouse: General Relations. *Renewable Energy* 36(1): 189-196.
- Ahmed, E. M., O. Abaas, M. Ahmed and M. R. Ismail. 2011. Performance Evaluation of Three Different Types of Local Evaporative Cooling Pads in Greenhouses in Sudan. *Saudi Journal of Biological Sciences* 18(1): 45-51.
- Arvanitis, K. G., P. N. Paraskevopoulos and A. A. Vernardos. 2000. Multirate Adaptive Temperature Control of Greenhouses. *Computers and Electronics in Agriculture* 26(3): 303-320.
- ASAE. 1988. *Asae Engineering Practice. Heating, Ventilating and Cooling Greenhouses*. St. Joseph, ASAE.
- ASHRAE. 2005. *Ashrae Handbook - Fundamentals*. Atlanta, ASHRAE.
- Bailey, B. J. 1981. The Evaluation of Thermal Screens in Glasshouses on Commercial Nurseries. *Acta Horticulturae* 115: 663-670.
- Bayramoglu, Z. and E. Gundogmus. 2009. The Effect of Eurepgap Standards on Energy Input Use: A Comparative Analysis between Certified and Uncertified Greenhouse Tomato Producers in Turkey. *Energy Conversion and Management* 50(1): 52-56.
- Benli, H. and A. Durmus. 2009. Evaluation of Ground-Source Heat Pump Combined Latent Heat Storage System Performance in Greenhouse Heating. *Energy and Buildings* 41: 220 - 228.
- Black, C. C., Jr. 1986. Effects of Co₂ Concentration on Photosynthesis and Respiration of C₄ and CAM Plants. In *Carbon Dioxide Enrichment of Greenhouse Crops*. Boca Raton, FL, CRC Press.
- Black, W. Z. and J. G. Hartley. 1996. *Thermodynamics*. New York, HarperCollins College Publishers.
- Boaventura Cunha, J., C. Couto and A. E. Ruano. 1997. Real-Time Parameter Estimation of Dynamic Temperature Models for Greenhouse Environmental Control. *Control Engineering Practice* 5(10): 1473-1481.
- Bot, G. P. A. 1983. *Greenhouse Climate: From Physical Processes to a Dynamic Model*. Ph.D. Wageningen

- Bowman, G. E. 1970. The Transmission of Diffuse Light by a Sloping Roof. *Journal of Agricultural Engineering Research* 15(2): 100-105.
- Bravdo, B. 1986. Effect of CO₂ Enrichment on Photosynthesis of C₃ Plant. In *Carbon Dioxide Enrichment of Greenhouse Crops*. Vol. II. Boca Raton, FL, CRC Press.
- Cabrera, F. J., A. Baille, J. C. López, M. M. González-Real and J. Pérez-Parra. 2009. Effects of Cover Diffusive Properties on the Components of Greenhouse Solar Radiation. *Biosystems Engineering* 103(3): 344-356.
- Campbell, G. S. 1977. *An Introduction to Environmental Biophysics*. New York, Springer-Verlag.
- Castañeda-Miranda, R., J. E. Ventura-Ramos, R. del Rocío Peniche-Vera and G. Herrera-Ruiz. 2006. Fuzzy Greenhouse Climate Control System Based on a Field Programmable Gate Array. *Biosystems Engineering* 94(2): 165-177.
- Cathey, H. M. and L. E. Campbell. 1980. Light and Lighting Systems for Horticultural Plants. *Horticultural reviews* 2: 491-537.
- Ceulemans, R. 1986. Effects of Supplemental Irradiation with Hid Lamps, and Nft Gutter Size on Gas-Exchange, Plant Morphology and Yield of Strawberry Plants. *Scientia Horticulturae* 28(1-2): 71-83.
- Chalabi, Z. S. 1992. A Generalized Optimization Strategy for Dynamic CO₂ Enrichment in a Greenhouse. *European Journal of Operational Research* 59(2): 308-312.
- Chalabi, Z. S., A. Biro, B. J. Bailey, D. P. Aikman and K. E. Cockshull. 2002. SE--Structures and Environment: Optimal Control Strategies for Carbon Dioxide Enrichment in Greenhouse Tomato Crops, Part II: Using the Exhaust Gases of Natural Gas Fired Boilers. *Biosystems Engineering* 81(3): 323-332.
- Chalabi, Z. S., A. Biro, B. J. Bailey, D. P. Aikman and K. E. Cockshull. 2002. SE--Structures and Environment: Optimal Control Strategies for Carbon Dioxide Enrichment in Greenhouse Tomato Crops--Part 1: Using Pure Carbon Dioxide. *Biosystems Engineering* 81(4): 421-431.
- Chinese, D., A. Meneghetti and G. Nardin. 2005. Waste-to-Energy Based Greenhouse Heating: Exploring Viability Conditions through Optimisation Models. *Renewable Energy* 30(10): 1573-1586.
- Chou, S. K., K. J. Chua, J. C. Ho and C. L. Ooi. 2004. On the Study of an Energy-Efficient Greenhouse for Heating, Cooling and Dehumidification Applications. *Applied Energy*

77(4): 355-373.

- Critten, D. L. 1983. A Computer Model to Calculate the Daily Light Integral and Transmissivity of a Greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research* 28(1): 61-76.
- Critten, D. L. 1985. The Effect of House Length on the Light Transmissivity of Single and Multispan Greenhouses. *Journal of Agricultural Engineering Research* 32(2): 163-172.
- Critten, D. L. 1987. Light Transmission Losses Due to Structural Members in Multispan Greenhouses under Diffuse Skylight Conditions. *Journal of Agricultural Engineering Research* 38(3): 193-207.
- Critten, D. L. 1987. Light Transmission Losses Due to Structural Members in Multispans under Direct Light Conditions. *Journal of Agricultural Engineering Research* 38(3): 209-215.
- Djevic, M. and A. Dimitrijevic. 2009. Energy Consumption for Different Greenhouse Constructions. *Energy* 34(9): 1325-1331.
- Fernández, J. E. and B. J. Bailey. 1992. Measurement and Prediction of Greenhouse Ventilation Rates. *Agricultural and Forest Meteorology* 58(3-4): 229-245.
- Geoola, F., Y. Kashti and U. M. Peiper. 1998. A Model Greenhouse for Testing the Role of Condensation, Dust and Dirt on the Solar Radiation Transmissivity of Greenhouse Cladding Materials. *Journal of Agricultural Engineering Research* 71(4): 339-346.
- Geoola, F., Y. Kashti, M. Teitel, A. Levi, R. Brickman and I. Esquira. 2009. A Study of U Value of Greenhouse Films with Thermal Screens Using the Hot Box Method. *Acta Horticulturae* 893: 367-372.
- Hanan, J. J. 1998. *Greenhouses Advanced Technology for Protected Horticulture*. New York, CRC Press.
- Heij, G. and P. J. A. L. d. Lint. 1984. Prevailing CO₂ Concentrations in Glasshouses. *Acta Horticulturae* 162: 93-100.
- Hopkins, W. G. and N. P. A. Huner. 2004. *Introduction to Plant Physiology*. Hoboken, NJ, John Wiley & Sons.
- Leal Iga, J., J. Leal Iga, C. Leal Iga and R. A. Flores. 2008. Effect of Air Density Variations on Greenhouse Temperature Model. *Mathematical and Computer Modelling* 47(9-10): 855-867.

- Linker, R., I. Seginer and P. O. Gutman. 1998. Optimal CO₂ Control in a Greenhouse Modeled with Neural Networks. *Computers and Electronics in Agriculture* 19(3): 289-310.
- Lovichit, W., C. Kubota, C. Y. Choi and J. Schoonderbeek. 2007. Greenhouse Water Recovery System for Crop Production in Semi-Arid Climate. 2007 ASAE Annual Meeting. 074012.
- Lugt, P. M., A. de Niet, W. H. Bouwman, J. C. N. Bosma and C. M. van den Bleek. 1996. Catalytic Removal of Nox from Total Energy Installation Flue-Gases for Carbon Dioxide Fertilization in Greenhouses. *Catalysis Today* 29(1-4): 127-131.
- McKeag, R. 1965. Natural Gas as a Source of Co₂ for Greenhouse Plants. CO Flower Growers' Association research bull.
- Nijskens, J., J. Deltour, S. Coutisse and A. Nisen. 1984. Heat Transfer through Covering Materials of Greenhouses. *Agricultural and Forest Meteorology* 33(2-3): 193-214.
- Nijskens, J., J. Deltour, S. Coutisse and A. Nisen. 1985. Radiation Transfer through Covering Materials, Solar and Thermal Screens of Greenhouses. *Agricultural and Forest Meteorology* 35(1-4): 229-242.
- Okada, M. and T. Takakura. 1973. Guide and Data for Greenhouse Air Conditioning. 3. Heat Loss Due to Air Infiltration of Heated Greenhouse. *J. Agric. Meteor.* 28: 11-18.
- Pasgianos, G. D., K. G. Arvanitis, P. Polycarpou and N. Sigrimis. 2003. A Nonlinear Feedback Technique for Greenhouse Environmental Control. *Computers and Electronics in Agriculture* 40(1-3): 153-177.
- Sharma, P. K., G. N. Tiwari and V. P. S. Sorayan. 1999. Temperature Distribution in Different Zones of the Micro-Climate of a Greenhouse: A Dynamic Model. *Energy Conversion and Management* 40(3): 335-348.
- Shukla, A., G. N. Tiwari and M. S. Sodha. 2006. Thermal Modeling for Greenhouse Heating by Using Thermal Curtain and an Earth - Air Heat Exchanger. *Building and Environment* 41: 843 - 850.
- Song, J. 2010. Greenhouse Monitoring and Control System Based on Zigbee Wireless Sensor Network. *Electrical and Control Engineering 2010 International Conference*. 2785-2788.
- Taiz, L. and E. Zeiger. 1991. *Plant Physiology*. Redwood City, California, The Benjamin/Cummings Publishing Company.
- Trigui, M., S. Barrington and L. Gauthier. 2001. *Se--Structures and Environment: A Strategy*

for Greenhouse Climate Control, Part I: Model Development. Journal of Agricultural Engineering Research 78(4): 407-413.

Trigui, M., S. Barrington and L. Gauthier. 2001. SE--Structures and Environment: A Strategy for Greenhouse Climate Control, Part II: Model Validation. Journal of Agricultural Engineering Research 79(1): 99-105.

강금춘, 강연구, 유영선, 김영중, 이시영, 백이. 2009. 온풍난방기의 열효율 증대를 위한 열교환기 구조개선. 바이오시스템공학 34(5): 363-370.

고학균, 이대원, 최창현, 김채웅, 김재민, 권영삼. 1998. 다동온실의 복합환경 제어를 위한 시스템 개발. 생물생산환경조절 7(1): 1-8.

공성훈. 1999. 여름철, 파프리카 재배온실에서 실내환경조절 시스템과 건구온도 분포에 관한 연구. 한국태양에너지, 19(1): 59-65.

구건호, 송재관 and 박규식. 1998. 성주지역 참외전용 온실의 모델개발 및 환경분석(1). 한국생물환경조절학회지 7(4): 311-323.

기상청. 각년도. 기상월보. 기상청.

김영웅, 이상진, 김규형, 이인수. 2010. 작물성장환경 요소 및 유해 가스 모니터링 시스템. 한국지능시스템학회 2010년도 추계학술대회. 20: 331-334.

김영중, 강연구, 강금춘, 백이, 유영선. 2003. 태양전지 발전 온실개폐시스템 적용. 한국농업기계학회 학술대회. 165-170.

김영중, 유영선, 장진택, 강금춘, 이건중, 신정웅. 2000. 온풍난방기의 배기열을 이용한 지중 난방용 온수공급시스템의 열회수특성. 한국농업기계학회지 25(3): 221-226.

김영중, 유영선, 장진택, 이건중. 1999. 간접열식 LPG온풍난방기 개발. 한국농업기계학회.

남상운, 김영식. 2009. 토마토 재배 온실의 환경조절에 따른 온습도 균일도 분석. 생물환경조절학회지 18(3): 215-224.

박용정. 2007. 온실용 수평형 지열 히트펌프 시스템의 성능분석. 지열에너지 3(2): 19-28.

박용정, 김경훈. 2006. 축열조를 채용한 수평형 지열원 히트펌프 온실 난방 시스템에 관한 연구. 에너지공학 15(3): 194-201.

박우식, 김문기. 1998. 유전알고리즘을 이용한 온실지붕 형상의 최적설계 - 광투과율을 중심으로 -. 생물환경조절학회지 7(4): 290-297.

백이. 2010. 온실내 잉여열에너지 회수를 위한 팬코일 유닛시스템의 양액 가온효과. 한국농업기계학회 2010년 하계 학술대회.

- 서원명, 배용한, 유영선, 이성현, 윤용철. 2009. 온실내 잉여 태양에너지 산정(I) - 1-2w형을 중심으로 -. 한국농공학회논문집 51(5): 79-86.
- 임준택. 1998. 시설재배 오이의 생육모형과 최적 환경제어 소프트웨어 개발. 농림부.
- 장재철, 강은철, 이의준. 2009. 유리 온실 시설의 연간 냉난방 부하 및 에너지 시뮬레이션에 관한 연구. 한국태양에너지학회 2009년도 춘계 학술발표대회. 72-76.
- 진제용, 류관희, 홍순호. 1993. 작물의 성장정보 계측 및 생육제어에 관한 연구 I. 탄산가스 제어 알고리즘 개발. 생물생산환경조절 2(1): 27-36.

참고자료 1. 복합 환경-에너지 관리 알고리즘을 구현한 프로그램 코드

```
/**
// Filename : greenhouse.java
// Function : Realization of the algorithms for surplus energy treatment in
//             environmental control greenhouse
//             Heating, Heat recovery, CO2 enrichment, Supplementallight
//             and Heat pump
// Author : Seunghwan Yang (Seoul National University)
// Additional API : MySQL connector for JAVA
//             mysql-connector-java-5.0.8-bin.jar
//             Free download at
//             http://www.mysql.com/downloads/connector/j/
// Date : 2010.6.16 - 2011.3.7
**/
```

```
import java.util.Date;
import java.util.Calendar;
import java.text.SimpleDateFormat;
import java.sql.DriverManager;
import java.sql.Connection;
import java.sql.Statement;
import java.sql.ResultSet;
import java.io.File;
import java.io.FileOutputStream;
import java.io.FileInputStream;
import java.io.InputStreamReader;
import java.io.BufferedReader;
import java.io.RandomAccessFile;
import java.lang.Thread;
import java.util.Properties;
```

```
class opThread extends Thread {
    public void run() {

        String host = "127.0.0.1";
        String port = "3306";
        String dbid = "ebio";
        String dbpw = "rltnfdnjs123";
        String logpath = "D:/Greenhouse/bin/";
        String db = "greenhouse";
        String connectionScript = "jdbc:mysql://" + host + ":"
            + port + "/" + db + "?"
            + "user=" + dbid + "&password="
            + dbpw;

        int sleepSec = 60 * 1000;

        int iRsCnt = 0;
        String rec_date = "";
        float temp_in1 = 0;
        float temp_in2 = 0;
        float temp_out = 0;
```

```

float co2 = 0;
float humid = 0;
float solar = 0;
float w_spd = 0;
float w_dir = 0;
float temp2 = 0;
float co2_2 = 0;
float humid2 = 0;
float light = 0;
String maxdate = "";

float temp_LPG = 0;
float temp_tankh = 0;
float temp_tankl = 0;
float temp_cool_i = 0;
float temp_gh1 = 0;

int season = 0;
float grdw_temp_st = 0;
float grdw_temp_gap = 0;
float hp_recharge_temp = 0;
float hp_recharge_gap = 0;
float mr_heating_temp = 0;
float mr_heating_gap = 0;
float lpg_heating_temp = 0;
float lpg_heating_gap = 0;
String keep_co2 = "N";

String logMsg = "";
String log_result_file = "";
String log_error_file = "";

String olddataset = "";
String newdataset = "";

boolean bCO2_waiting = false;
boolean bHP_10deg = false;

int ctrErrCnt = 0;

while(true) {
    try {
        Calendar now_cal = Calendar.getInstance();

        SimpleDateFormat sdf = new SimpleDateFormat("yyyy-MM-dd HH:mm:ss");
        SimpleDateFormat sdf_hhmm = new SimpleDateFormat("HH:mm");
        SimpleDateFormat log_sdf = new SimpleDateFormat("yyyy-MM");
        log_result_file = logpath + "log_result" + log_sdf.format(new Date()) + ".txt";
        log_error_file = logpath + "log_error" + log_sdf.format(new Date()) + ".txt";

        String query = "";

```



```

Class.forName("com.mysql.jdbc.Driver");

Connection conn = DriverManager.getConnection(connectionScript);
Statement stmt = conn.createStatement();
ResultSet rs = null;

//*****//
//          Strat of Energy equipment control          //
//*****//
System.out.println("");
System.out.println("*** Energy equipment auto control ***");

// Read values from setpoint table.
String mode = "";

// Default values are OFF conditions.
String cooling_temp_st = "50";
String cooling_temp_gap = "1";
String cooling_temp_ed = "99";

String heating_temp_st = "2";
String heating_temp_gap = "1";
String heating_sub_st = "1";
String heating_sub_gap = "1";
float sub_heater_st = 1;

String co2_conc = "100";
String co2_gap = "10";
boolean co2_working = false;

String light_control = "0";
String light_limit = "0";

String hp_low_temp = "35";
String hp_low_gap = "3";
String hp_high_temp = "10";
String hp_high_gap = "3";
String hp_rad_temp = "1";
String hp_rad_gap = "3";

String NowHHMM = sdf_hhmm.format( new java.util.Date() );

//*****//
//          Read setpoints from database          //
//*****//
query = " SELECT * FROM setpoint "
      + " WHERE num = 1 "
      + " AND '" + NowHHMM + "' BETWEEN CONCAT(hh_st, ':', mm_st)
AND CONCAT(hh_ed, ':', mm_ed) ";
rs = stmt.executeQuery(query);

while (rs.next()) {
    mode = rs.getString("mode");
}

```

```

if (mode.equals("COOL")) {
    cooling_temp_st = rs.getString("value1");
    cooling_temp_gap = rs.getString("value2");
    cooling_temp_ed = rs.getString("value3");
} else if (mode.equals("HEAT")) {
    heating_temp_st = rs.getString("value1");
    heating_temp_gap = rs.getString("value2");
    // heating_sub_st = rs.getString("value3");
    sub_heater_st = rs.getFloat("value3");
    heating_sub_gap = rs.getString("value4");
} else if (mode.equals("CO2")) {
    co2_conc = rs.getString("value1");
    co2_gap = rs.getString("value2");
} else if (mode.equals("LIGHT")) {
    light_limit = rs.getString("value1");
    light_control = "1";
} else if (mode.equals("HP")) {
    hp_low_temp = rs.getString("value1");
    hp_low_gap = rs.getString("value2");
    hp_high_temp = rs.getString("value3");
    hp_high_gap = rs.getString("value4");
    hp_rad_temp = rs.getString("value5");
    hp_rad_gap = rs.getString("value6");
}
}

```

```

//*****//
//          Read status from control table          //
//*****//

```

```

" query = " SELECT cooling_status, heating_status, co2_status, light_status, hp_status

```

```

    + " FROM control "
    + " WHERE num = 1 ";
rs = stmt.executeQuery(query);

```

```

int cooling_status = 0;
int heating_status = 0;
int co2_status = 0;
int light_status = 0;
int hp_status = 0;

```

```

if (rs.next()) {
    cooling_status = rs.getInt("cooling_status");
    heating_status = rs.getInt("heating_status");
    co2_status = rs.getInt("co2_status");
    light_status = rs.getInt("light_status");
    hp_status = rs.getInt("hp_status");
    logMsg = "Status(0-OFF, 1-ON, 2-AUTO) : cooling(" + cooling_status + ")

```

```

heating(" + heating_status + ") "
    + "co2(" + co2_status + ") light(" + light_status + ") hp(" +
hp_status + ")";

```

```

System.out.println(logMsg);

```

```

    }

//*****//
//      Read environment and system data from systemdata table      //
//*****//

    query = " SELECT * FROM systemdata "
           + " ORDER BY rec_date desc "
           + " LIMIT 0, 1 ";
    rs = stmt.executeQuery(query);

    temp_LPG = 0;
    temp_tankh = 0;
    temp_tankl = 0;
    temp_cool_i = 0;
    temp_gh1 = 0;

    if (rs.next()) {
        temp_LPG = rs.getFloat("temp_tankl2");
        temp_tankh = rs.getFloat("temp_tankh");
        temp_tankl = rs.getFloat("temp_tankl1");
        temp_cool_i = rs.getFloat("temp_cool_i");
        temp_gh1 = rs.getFloat("temp_gh1");
    }

    query = " SELECT * FROM sub_control "
           + " WHERE num = 1 ";
    rs = stmt.executeQuery(query);
    if (rs.next()) {
        season = rs.getInt("season");
        hp_recharge_temp = rs.getFloat("hp_recharge_temp");
        hp_recharge_gap = rs.getFloat("hp_recharge_gap");
        mr_heating_temp = rs.getFloat("mr_heating_temp");
        mr_heating_gap = rs.getFloat("mr_heating_gap");
        lpg_heating_temp = rs.getFloat("lpg_heating_temp");
        lpg_heating_gap = rs.getFloat("lpg_heating_gap");
        keep_co2 = rs.getString("keep_co2");
    }

//*****//
//      CO2 control for avoiding LPG-liquifaction                //
//      -. Case 1:Control by lpg_heating_temp                    //
//      -. Case 2:Set by 10'C (now)                              //
//*****//

    float co2_stop_temp = 10;
    float co2_restart_temp = 11;
    if (temp_LPG <= co2_stop_temp) { bCO2_waiting = true; }
    if (temp_LPG >= co2_restart_temp) { bCO2_waiting = false; }

    if (bCO2_waiting) {
        co2_status = 0;
        logMsg = sdf.format(new Date()) + " >> CO2 is stopped. (" + temp_LPG + "
< " + co2_restart_temp + ")";

```

```

        } else {
            logMsg = sdf.format(new Date()) + " >> CO2 is normal. (" + temp_LPG + " >
" + co2_stop_temp + ")";
        }
        System.out.println("# " + logMsg);
        fileWrite(log_result_file, logMsg);

//*****//
//          Thermal Storage Tank Check : Full or not          //
//*****//
        boolean isWinter = false;
        if (season == 3) { isWinter = true; }

        boolean isHeatFull = false;

        float f_hp_low_temp = Float.parseFloat(hp_low_temp) + 0.2f;
        float f_hp_high_temp = Float.parseFloat(hp_high_temp) -
Float.parseFloat(hp_high_gap) - 0.2f;

        if (temp_tankl > f_hp_low_temp) { // Low temp. tank condtion.
            if (temp_tankh > f_hp_high_temp) { // High temp. tank condtion.
                isHeatFull = true;
            }
        }

//*****//
//          Decision of whether operating the device or not          //
//*****//
        switch (cooling_status) {
            case 0 : // OFF
                cooling_temp_st = "50";
                cooling_temp_gap = "1";
                cooling_temp_ed = "99";
                break;
            case 1 : // ON
                cooling_temp_st = "2";
                cooling_temp_gap = "1";
                cooling_temp_ed = "99";
                break;
            case 2 : // AUTO
                // The values decided above
        }

        switch (heating_status) {
            case 0 : // OFF
                heating_temp_st = "2";
                heating_temp_gap = "1";
                heating_sub_st = "1";
                heating_sub_gap = "10";
                break;
            case 1 : // ON (Sub-heater is off although status is ON)

```

```

        heating_temp_st = "99";
        heating_temp_gap = "10";
        heating_sub_st = "1";
        heating_sub_gap = "10";
        break;
    case 2 : // AUTO
        // The values decided above

        // Exception on Sub-heater
        if (temp_tankh < sub_heater_st) {
            if (bLightOFF) {
                heating_sub_st = "40"; // Based on greenhouse temp. inside
                logMsg = sdf.format(new Date()) + " >> Ground Water ON (" +
temp_tankh + " < " + sub_heater_st + ")";
            } else {
                logMsg = sdf.format(new Date()) + " >> Ground Water OFF by
Light ON";
            }
            System.out.println("# " + logMsg);
            fileWrite(log_result_file, logMsg);
        }
    }

    switch (co2_status) {
        case 0 : // OFF
            co2_conc = "100";
            co2_gap = "10";
            break;
        case 1 : // ON
            co2_conc = "9999";
            co2_gap = "100";
            break;
        case 2 : // AUTO
            // The values decided above
    }

    switch (light_status) {
        case 0 : // OFF
            light_control = "0";
            break;
        case 1 : // ON
            light_control = "1";
            break;
        case 2 : // AUTO
            // The values decided above
    }

    switch (hp_status) {
        case 0 : // OFF
            hp_low_temp = "35";
            hp_low_gap = "3";
            hp_high_temp = "10";
            hp_high_gap = "3";

```

```

        hp_rad_temp = "99";
        hp_rad_gap = "10";
        break;
    case 1 :    // ON
        hp_low_temp = "5";
        hp_low_gap = "2";
        hp_high_temp = "60";
        hp_high_gap = "2";
        hp_rad_temp = "10";
        hp_rad_gap = "3";
        break;
    case 2 :    // AUTO
//*****//
//    Heat re-charge automation                                //
//    : IF (high tank temp < 30 'C)                            //
//          and (low tank temp > 10 'C),                        //
//          Then heatpump ON up to 10'C.                       //
//*****//
        if (temp_tankh >= (hp_recharge_temp+hp_recharge_gap)) {    bHP_10deg =
false;    }
        if (temp_tankh <= hp_recharge_temp && temp_tankl > 10) {    bHP_10deg
= true;    }

        if (bHP_10deg) {
            hp_low_temp = "10";
            logMsg = sdf.format(new Date()) + " >> Heatpump ON by low temp.
(" + temp_tankh + " < " + (hp_recharge_temp+hp_recharge_gap) + ")";
        } else {
            logMsg = sdf.format(new Date()) + " >> Heatpump is normal. (H:" +
temp_tankh + ", L:" + temp_tankl + ")";
        }

        System.out.println("# " + logMsg);
        fileWrite(log_result_file, logMsg);

        // Other values decided above
        break;
    }

//*****//
//          Insert commands for device operations & logging    //
//*****//

    newdataset = "CL:" + cooling_temp_st + "," + cooling_temp_gap + "," +
cooling_temp_ed
                + " HT:" + heating_temp_st + "," + heating_temp_gap + "," + heating_sub_st
+ "," + heating_sub_gap
                + " CO2:" + co2_conc + "," + co2_gap
                + " LT:" + light_control
                + " HP:" + hp_low_temp + "," + hp_low_gap + "," + hp_high_temp + "," +
hp_high_gap + "," + hp_rad_temp + "," + hp_rad_gap;

    iRsCnt = 0;

```

```

if (!newdataset.equals(olddataset)) {
    query = " UPDATE control "
        + " SET cooling_temp_st = " + cooling_temp_st + ", "
        + "      cooling_temp_gap = " + cooling_temp_gap + ", "
        + "      cooling_temp_ed = " + cooling_temp_ed + ", "
        + "      heating_temp_st = " + heating_temp_st + ", "
        + "      heating_temp_gap = " + heating_temp_gap + ", "
        + "      heating_sub_temp = " + heating_sub_st + ", "
        + "      heating_sub_gap = " + heating_sub_gap + ", "
        + "      co2_conc = " + co2_conc + ", "
        + "      co2_gap = " + co2_gap + ", "
        + "      light_control = " + light_control + ", "
        + "      hp_low_temp = " + hp_low_temp + ", "
        + "      hp_low_gap = " + hp_low_gap + ", "
        + "      hp_high_temp = " + hp_high_temp + ", "
        + "      hp_high_gap = " + hp_high_gap + ", "
        + "      hp_rad_temp = " + hp_rad_temp + ", "
        + "      hp_rad_gap = " + hp_rad_gap
        + " WHERE num = 1 ";

    iRsCnt += stmt.executeUpdate(query);

    query = " INSERT INTO control "
        + "      (num, rec_date, "
        + "      cooling_status, cooling_temp_st, cooling_temp_gap,
cooling_temp_ed, "
        + "      heating_status, heating_temp_st, heating_temp_gap,
heating_sub_temp, heating_sub_gap, "
        + "      co2_status, co2_conc, co2_gap, "
        + "      light_status, light_control, "
        + "      hp_status, hp_low_temp, hp_low_gap, hp_high_temp,
hp_high_gap, hp_rad_temp, hp_rad_gap) "
        + " VALUES(0, now(), "
        + "      " + cooling_status + ", " + cooling_temp_st + ", " +
cooling_temp_gap + ", " + cooling_temp_ed + ", "
        + "      " + heating_status + ", " + heating_temp_st + ", " +
heating_temp_gap + ", " + heating_sub_st + ", " + heating_sub_gap + ", "
        + "      " + co2_status + ", " + co2_conc + ", " + co2_gap + ", "
        + "      " + light_status + ", " + light_control + ", "
        + "      " + hp_status + ", " + hp_low_temp + ", " + hp_low_gap + ",
" + hp_high_temp + ", " + hp_high_gap + ", " + hp_rad_temp + ", " + hp_rad_gap + ") ";

    iRsCnt += stmt.executeUpdate(query);

    logMsg = sdf.format(new Date()) + " >> " + newdataset;
    System.out.println("# " + logMsg);
    fileWrite(log_result_file, logMsg);

    olddataset = newdataset;
}

System.out.println("");

```



```

        stmt_r.close();
        conn_r.close();
        stmt.close();
        conn.close();

    } catch (Exception e) {
        System.out.println(e.toString());
        fileWrite(log_error_file, e.toString());
    }

    try {
        Thread.sleep(sleepSec);
    } catch (Exception e) {
        System.out.println(e.toString());
        fileWrite(log_error_file, e.toString());
    }
}
}

```

```

//*****//
//          Sub function for logging into file          //
//*****//

```

```

public static void fileWrite(String logfile, String str){

    File file = new File(logfile);

    FileOutputStream writer;
    RandomAccessFile raf = null;

    try{

        String strLine = "";

        raf = new java.io.RandomAccessFile(file, "rw");
        raf.seek(raf.length());

        writer = new java.io.FileOutputStream(raf.getFD());

        strLine = new String( str +"\r\n" );
        writer.write(strLine.getBytes());
        raf.close();

    }catch( Exception e ){
        e.printStackTrace();
    }

}

```

```

//*****//
//          Sub function for convering String to Integer          //
//*****//

```

```

//*****//
public static int isNUM(String str) {
    try {
        if (str == null || str.equals("")) {
            return 0;
        } else {
            return Integer.parseInt(str);
        }
    } catch (Exception e) {
        // e.printStackTrace();
        return 0;
    }
}

class greenhouse {

    public static void main(String[] args) {
        opThread opt = new opThread();
        opt.start();
        System.out.println("Greenhouse demon stared.");
    }
}

```